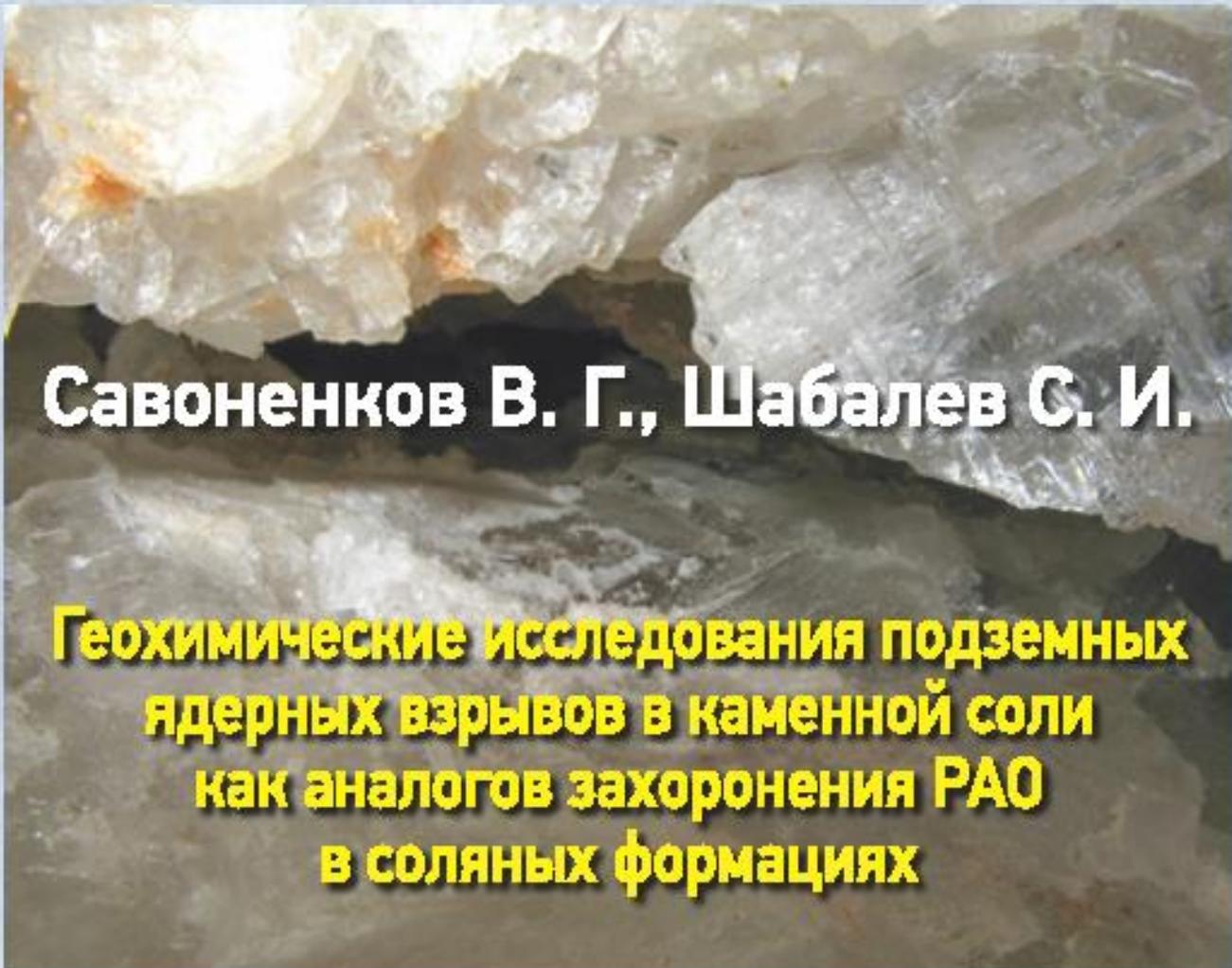


Государственная корпорация по атомной энергии «РОСАТОМ»
Радиовый институт им. В. Г. Хлопина



Савоненков В. Г., Шабалев С. И.

**Геохимические исследования подземных
ядерных взрывов в каменной соли
как аналогов захоронения РАО
в соляных формациях**

Санкт-Петербург
2014

Савоненков В.Г., Шабалев С.И. Геохимические исследования подземных ядерных взрывов в каменной соли как аналогов захоронения РАО в соляных формациях. СПб. Издательский дом «Инфо Ол», 2014. 270 с.; ил.101, табл. 61, библиограф. 283 назв.

Рассмотрены изолирующие свойства соляных формаций, используемых в качестве перспективной геологической среды для захоронения радиоактивных отходов (РАО). Представлены результаты комплексных исследований специалистов Радиевого института им. В.Г. Хлопина, проведенных в 1965-1984 гг. при выполнении Государственной программы «Ядерные взрывы для народного хозяйства» на объектах, где в качестве вмещающей геологической среды были каменные соли. Выделено новое научное направление – геохимия подземных ядерных взрывов, которое включает изучение структурно-геохимических зон, минеральные формы нахождения и возможности миграции техногенных радионуклидов. Аналогом изменений горных пород под воздействием ядерных взрывов является ударно-термальный метаморфизм.

Разработаны дополнительные геохимические критерии, определяющие условия длительной изоляции РАО. Определены условия изоляции особых отходов ядерно-взрывных технологий в ряде соляных и солянокупольных структур – Большой Азгир, Оренбургский вал, Сеитовская структура, Карачаганакский соляной купол.

Приведены результаты изучения первых подземных ядерных взрывов, проведенных в США в каменной соли – «Гном» и «Селмон» (1961, 1964 гг.). Представлен обзор характерных особенностей соляных формаций и слагающих их минералов. Рассмотрены перспективные участки строительства хранилищ, и особенности разработки месторождений каменной соли. Обсуждаются геологические проблемы захоронения РАО.

Табл. 61. Ил. 101. Библиогр.: 283 назв.

Редактор О.Д. Федорова

Оглавление

Введение	4
1. Образование и развитие соленосных формаций	7
1.1. Экранирующие свойства соляных формаций.....	12
1.2. Соляная тектоника.....	13
1.3. Гидрогеология соляных формаций.....	18
1.4. Строительство подземных сооружений в соляных толщах	20
1.5. Минералы хемогенных пород	25
1.5.1. Галит	25
1.5.2. Сильвин	35
1.5.3. Ангидрит	37
1.5.4. Гипс.....	38
1.5.5. Карналлит	39
2. Ударный метаморфизм	40
3. Первые ядерные взрывы в каменной соли, проведенные в США.....	47
4. Государственная программа СССР «Ядерные взрывы для народного хозяйства».....	53
5. Солянокупольная структура Большой Азгир. Площадка «Галит».....	61
5.1. Радиоактивные продукты и структурно-геохимические зоны взрыва А-I.....	73
5.2. Взрывы в солях с примесью ангидрита А-II, А-III, А-IV	95
5.3. Условия изоляции техногенных радионуклидов в солянокупольной структуре Большой Азгир	113
6. Полости-хранилища на Оренбургском газоконденсатном месторождении	133
7. Астраханское газоконденсатное месторождение. Объект «Вега»	139
8. Карачаганакское газоконденсатное месторождение. Объект «Ли́ра»	169
9. Хранилища радиоактивных отходов в каменной соли.....	181
10. Перспективные участки строительства ПЗРО и особенности разработки соляных месторождений	205
11. Проблемы захоронения радиоактивных отходов.....	232
11.1. Прогнозирование безопасности подземной изоляции РАО.....	234
11.1.1. Краткосрочное прогнозирование	234
11.1.2. Долгосрочное прогнозирование.....	237
11.2. Ликвидация негативных явлений	245
11.3. Сохранение и оптимизация информации.....	248
Заключение.....	252
Литература.....	254

Введение

Каменная соль – широко распространенная горная порода, которая, несмотря на легкую растворимость в воде, сохраняется среди геологических формаций различных континентальных структур в течение сотен миллионов лет. Каменная соль – важнейшее полезное ископаемое, необходимое как для прямого пищевого употребления, так и в широком спектре химико-технологической переработки.

Соляные формации – геологическая среда, широко используемая в мировой практике для строительства подземных сооружений различного целевого назначения: хранилищ жидких углеводородов, химических продуктов, газов, складских помещений, лечебных учреждений и пр.

Каменная соль – первая, и пока единственная геологическая формация, которая была рекомендована и реально использована для подземной изоляции радиоактивных отходов. В документах МАГАТЭ каменная соль оценивается как малопроницаемая, пластичная и практически необводненная геологическая среда с малоэнергетическими условиями строительства подземных выработок. Обширные сырьевые запасы каменной соли позволяют использовать соляные формации для строительства подземных хранилищ радиоактивных отходов. Исключения составляют месторождения калийных солей, пространственно и генетически связанные с соляными формациями.

Первое подземное хранилище для низко- и среднеактивных отходов было создано в Германии в отработанной шахте и эксплуатировалось в течение 1986–2009 гг. В США в 1999 г. сдана в эксплуатацию установка WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) – могильник для радиоактивных отходов, содержащих трансураниевые элементы, размещенный в пласте каменной соли на глубине 600 м.

Изучение каменной соли специалистами Радиевого института связано с участием в Государственной программе «Ядерные взрывы для народного хозяйства», которая выполнялась в СССР в 1965–1988 гг. Уникальные свойства соляных пород позволяли использовать ядерно-взрывные технологии при решении ряда крупных научных и практических задач. Для проведения комплексных исследований в институте организован специальный отдел под руководством д.х.н. А. С. Кривоухатского, в который вошли специалисты различных научных направлений физического, химического, геохимического, дозиметрического и радиологического отделов.

Наибольший интерес и сложность для реализации представляла проблема ядерно-взрывной наработки изотопов. Это научное направление возглавил академик Ю. Б. Харитон (ВНИИЭФ). По разработанной программе на объекте «Галит» в течение 9 лет проводились комплексные исследования экспериментальных взрывов. В 1977 г. проблема была решена на всех последовательных этапах – от технологии создания ядерным взрывом искусственного месторождения до добычи рудного компонента и его радиохимической переработки на опытно-промышленных установках.

Одновременно на экспериментальной площадке «Галит» был проведен большой объем научно-исследовательских и экспериментальных работ по разработке технологии подготовки и эксплуатации подземных полостей-резервуаров для хранения газоконденсата промышленных объединений Мингазпрома. Научно обоснованы и практически внедрены регламенты безопасной эксплуатации хранилищ, созданных методом ядерно-взрывных технологий.

Высокий уровень проводимых работ подтверждается присуждением в 1977 и 1985 гг. научным сотрудникам, работавшим по Программе мирного использования ядерных взрывов, в число которых входили и специалисты Радиевого института, Государственных премий СССР в области науки и техники.

При решении научно-практических задач проведен комплекс геохимических исследований – выделены и охарактеризованы структурно-геохимические зоны взрывов в солях, исследованы радиоактивные продукты, закономерности их образования и распределения в полостях и ореольных зонах, состав и происхождение полостных газов и др. Совокупность собранных данных позволила выделить новое научное направление – геохимию подземных ядерных взрывов.

В качестве ключевой геохимической задачи рассматриваются условия изоляции техногенных радионуклидов – радиоактивных отходов ядерно-взрывных технологий – в соляных формациях. Многочисленные формы нахождения взрывных отходов, включая радиоактивные рассолы, и отсутствие инженерных барьеров определяют актуальность таких исследований для оценки соляных формаций как среды для сооружения подземных хранилищ-могильников РАО.

Научное обоснование изолирующих свойств каменной соли потребовало привлечения результатов различных исследований в области минералогии и геологии соляных формаций, данных по разработке соляных месторождений с учетом имеющегося опыта захоронения РАО в каменной соли. Существенным вкладом для оценки изолирующих свойств соляных формаций явились результаты натуральных крупномасштабных экспериментов – подземных ядерных взрывов. Последние следует рассматривать как аналоги захоронения РАО с возможностью получения экспериментальных данных о характере миграционных процессов в специфических условиях солянокупольных структур.

В ходе геохимических исследований разработаны и обоснованы дополнительные критерии оценки пригодности соляных формаций для подземной изоляции РАО. С этой целью используется присутствие и «консервация» в каменной соли пород, групп минералов, элементов или фрагментов древней флоры и фауны, не характерных для основного процесса солеобразования. Для оценки «закрытости» соляных массивов предлагается использовать возрастные метки, полученные калий-аргоновым методом, с учетом возможности локальной миграции ^{40}Ar в пределах соляного массива.

На территории Российской Федерации в течение нескольких десятилетий ведутся наблюдения за площадками проведения мирных ядерных взрывов, мест захоронения особых радиоактивных отходов. Обеспечение безопасности осуществляется техническим обслуживанием и активным мониторингом объектов.

При всех преимуществах изоляции РАО в геологические формации до настоящего времени остается нерешенным вопрос долгосрочного прогнозирования стабильности и сохранения основных барьерных свойств геологической среды на участке размещения ПЗРО. Для решения этой сложной научно-теоретической задачи необходимо привлечение данных различных направлений наук о Земле, использование достигнутого за последнее время высокого уровня обработки и интерпретации информации.

Актуальной для реализации проектов строительства подземных хранилищ, как и для всей атомно-энергетической отрасли, остается проблема изначального неприятия населением строительства любого объекта, связанного с радиоактивностью. Принятие решений по научно-техническим вопросам оказывается в зависи-

мости от социально-экономических условий и информированности населения. Широко распространенная радиофобия постоянно подогревается дезинформацией далеких от науки общественных движений и объединений. За пределы здравого смысла уходят рассуждения о катастрофических последствиях проведения подземных ядерных взрывов.

Приведенные данные по изучению мирных взрывов в каменной соли раскрывают широкий спектр комплексных исследований, направленных на обеспечение безопасности уже существующих особых радиоактивных отходов ядерно-взрывных технологий. Использование вмещающих горных пород в качестве основного защитного барьера определяет статус ядерных взрывов как аналогов захоронения РАО в геологических формациях.

Вся совокупность рассмотренных в монографии общих характеристик соляных формаций, результаты комплексных исследований подземных ядерных взрывов, опыт разработки каменных и калийных солей и, наконец, эксплуатация хранилищ радиоактивных отходов в соляных формациях представляет обширную комплексную информацию, позволяющую научно обосновать перспективность каменной соли для изоляции РАО. Исследования последних лет подтвердили широкие возможности и разнообразные варианты использования соляных формаций для строительства подземных сооружений различного целевого назначения.

1. Образование и развитие соленосных формаций

К соленосным геологическим формациям относятся отложения, включающие пласты каменной соли, калийных солей, ангидритов и гипсов. Эту совокупность пород иногда называют хемогенными. Формирование и накопление легко растворимых солей происходит при галогенезе – стадии развития водоемов аридных зон с повышенным содержанием солей [1].

Общепринятая теория «классического» галогенеза встречает ряд затруднений при объяснении условий интенсивного и крупномасштабного накопления солей из перенасыщенных морских вод [2]. Например, подсчитано, что для накопления солей, содержащихся в структурах Прикаспийской низменности, необходимо испарить за сравнительно небольшой промежуток времени (несколько десятков сотен тысяч лет) почти одну десятую часть объема Мирового океана при современной солености его вод. Возникла гипотеза о поступлении соли по разрывным нарушениям земной коры из мантии и ее накоплении в глубоководных бассейнах. Однако, в пластах соли обнаруживают ископаемую пыльцу и споры растений, свидетельствующие о неглубинном генезисе осадка. Кроме того, установлено, что соляные пласты в центральных частях впадин по направлению к их краям переходят в типично прибрежно-лагунные осадки. Это также свидетельствует о сравнительно небольших глубинах древних солеродных бассейнов.

К собственно соляным (галогенным) формациям относятся породы, образовавшиеся на средних и высоких стадиях осолонения бассейна, от массового выпадения в осадок сульфатов кальция до кристаллизации легко растворимых хлоридов и сульфатов калия и магния.

Например, формирование соленосной толщи крупнейшего солеродного бассейна, существовавшего в нижнепермское время в пределах Прикаспийской впадины, началось со смены осадения известняков осадками доломитов и гипсов с переходом карбонатно-терригенных пород к сульфатным. В дальнейшем при осолонении вод до 22-25% произошло мощное и интенсивное накопление каменной соли – галитовой толщи.

Разнообразные по происхождению и составу соленосные формации подразделяются на комплексы или отдельные формации, различия которых определяются гидрохимическим типом исходных вод в осолоняющемся водоеме и структурно-тектоническими условиями (интенсивностью погружения дна бассейна) [3].

Галогенно-калиеносная формация представлена пластами каменной соли и калийных солей, перемежающихся с гипсами, ангидритами, известняками, доломитами, мергелями и с резко подчиненными количествами (примесями) алевролитов, аргиллитов, засоленных песчаников. Коэффициент соленасыщенности формации составляет 60% и более.

Галитовая формация представлена каменной солью, ангидритами, доломитами и мергелями с прослоями алевролитов, аргиллитов и песчаников. Коэффициент соленасыщенности варьирует от 35 до 55%.

Карбонатно-сульфатная формация представлена известняками, гипсами и ангидритами, неравномерно чередующимися известняками, мергелями, доломитами, ангидритами и гипсами с коэффициентами засоленности в широких пределах – от 10 до 60%, варьирующих для различных регионов соленакопления.

Образование и развитие того или иного типа формаций связано с режимом погружения дна солеродного бассейна, а также со структурно-тектоническими

условиями региона. Размещение крупных соляных формаций контролируется и определяется отрицательными структурами земной коры – впадинами на окраинах платформ, межгорными впадинами складчатых областей, внутриконтинентальными рифтовыми зонами. При этом структурно-фациальная обстановка соленакопления определяет распространенность и морфологию соляных залежей. Наиболее значительные площади с изометрической формой залежей характерны для внутренних и краевых впадин платформ.

Соляные формации относят к специфическим геологическим образованиям, в первую очередь, в связи со своей хорошей растворимостью в воде. Кроме того, высокая пластичность солей при их небольшой плотности ($2,1-2,2 \text{ г/см}^3$) предопределяет широкое проявление пластических деформаций этих пород в земной коре – соляной тектоники. Типичная осадочная порода – каменная соль может активно внедряться в перекрывающие её пласты с образованием диапиров – форм и структур, характерных для магматогенных пород.

Соляные отложения достаточно широко распространены. Осадочные бассейны, в которых происходило соленакопление, часто имеют глобальное значение. Процессы формирования таких бассейнов играли важную роль в истории геологического развития и общей эволюции земной коры.

В пределах границ бывшего СССР галогенные формации занимали почти 20% всей территории. Было разведано свыше 20 соленосных бассейнов, четыре из которых – Двинско-Сухонский, Волго-Эмбинский, Хатангский и Ангаро-Ленский – имеют площадь свыше 100 тыс. км². Запасы каменной соли разведанных месторождений составляют свыше 100 млрд. тонн [4].

Соляные формации и собственно каменная соль распространены на всех континентах планеты, исключая Антарктиду. Осадки химического происхождения – каменная соль, гипсы, ангидриты, доломиты, калийные соли и пр. – обнаружены во всех системах палеозоя, мезозоя и кайнозоя.

Накопление соленосных пород происходило, по-видимому, еще в докембрии, т.е. более 542 млн. лет назад. Однако в результате регионального метаморфизма докембрийских пород залежи каменной соли могли преобразовываться в скаполит- и турмалин-содержащие сланцы [5].

Эпоха древнейшего солеобразования, датируемая изотопно-геохронологическими методами, относится к нижнему кембрию. Кембрийские бассейны соленакопления известны в Восточной Сибири. Это Анагаро-Ленский бассейн, Саянский прогиб, Тасеевская и Березовская впадины [6]. В эту возрастную группу входят Иран-Пакистанский (Персидский) бассейн, менее крупные бассейны Макензи в Канаде, Амадиус и Пири-Торренс в Австралии.

Начиная с нижнего кембрия, в истории Земли выделены семь крупных эпох солеобразования. Накопление солей носит циклический характер: кратковременные интервалы интенсивного солеобразования продолжительностью не более 30 млн. лет сменяются длительными интервалами незначительного соленакопления протяженностью до 150 млн. лет (табл. 1) [5].

С кембрийскими отложениями связаны крупные соленосные бассейны – Восточно-Сибирский и Ирано-Пакистанский. Восточно-Сибирский бассейн с карбонатно-соленосными свитами нижнего кембрия занимает обширные территории южной и центральной части Восточно-Сибирской платформы [7]. В соленосный комплекс входят усольская, бельская и ангарская свиты, в которых мощность каменной соли составляет соответственно 200 – 1200, 50 – 200 и 80 – 200 м.

Таблица 1. Главные эпохи соленакопления [5].

Период	Абс. возраст, Длительность, млн.лет	Запасы соли 10 ¹⁵ т	Главные районы соленакопления
Кембрий	<u>570 – 540*</u> 20 – 30	3	Восточно-Сибирский, Ирано-Пакистанский, Канада, Австралия
Девон	<u>405 – 380</u> 30 – 40	3	Северо-Сибирский, Западно-Канадский, Припятско-Днепровско-Донецкий
Пермь	<u>270 – 230</u> 40	6 – 11	Прикаспийский, Средне-Европейский, Северо-Американский
Триас	<u>230 – 210</u> 20	1	Северо-Африканский
Юра	<u>155 – 140</u> 15	1	Среднеазиатский (Амударьинский)
Мел	<u>120 – 105</u> 15	0,4	Габонский
Миоцен	<u>25 – 15</u> 10	0,4	Месопотамский

* - принятые в наше время возрастные границы геологических периодов отличаются от данных, существовавших во время публикации статьи [5] в 1977 году.

Нижне-среднекембрийские формации Пакистанского бассейна простираются от границы Ирана с Кувейтом на западе до подножья низких Гималаев на востоке и от района Адена на юге до Каспийского моря на севере.

Соленосные формации девонского возраста распространены на территории, охватывающей Хатангский и Компендяйский прогибы Северо-Сибирского бассейна, в котором суммарная мощность каменной соли достигает 1000 м. В Днепровско-Донецкой впадине залегают две верхнедевонские формации с суммарной мощностью 2000 – 3000 м, и нижнепермская (ассельская) формация – с мощностью до 2000 м.

Одной из основных эпох галогенного осадконакопления считается пермская – 250-300 млн. лет. В это время в Евразии, Северной и Южной Америке, объединенных в едином материке Пангея (рис. 1), существовал огромный солеродный бассейн. Аридные условия были характерны для центральной части Северной Америки, Европы, запада Казахстана и Средней Азии. Один из самых крупных солеродных бассейнов располагался на территории штатов Оклахома, Нью-Мексико, Канзас и Техас. Соленакопление происходило в Польско-Германской, Московской, Днепровско-Донецкой, Прикаспийской впадинах, в Молдавии, Предуралье, Джезказганской и Тенгизской впадинах Казахстана.

Несколько крупных соляных бассейнов расположены на территории Российской Федерации (рис. 2). В пределах Восточно-Европейского бассейна галогенные отложения пермского возраста распространены на площади свыше 1,5 млн. км². В этот бассейн входят соленосные формации Мезенской впадины, Московской сине-

клизы, Предуральяского прогиба, Донецко-Днепровской и Прикаспийской впадины [8].

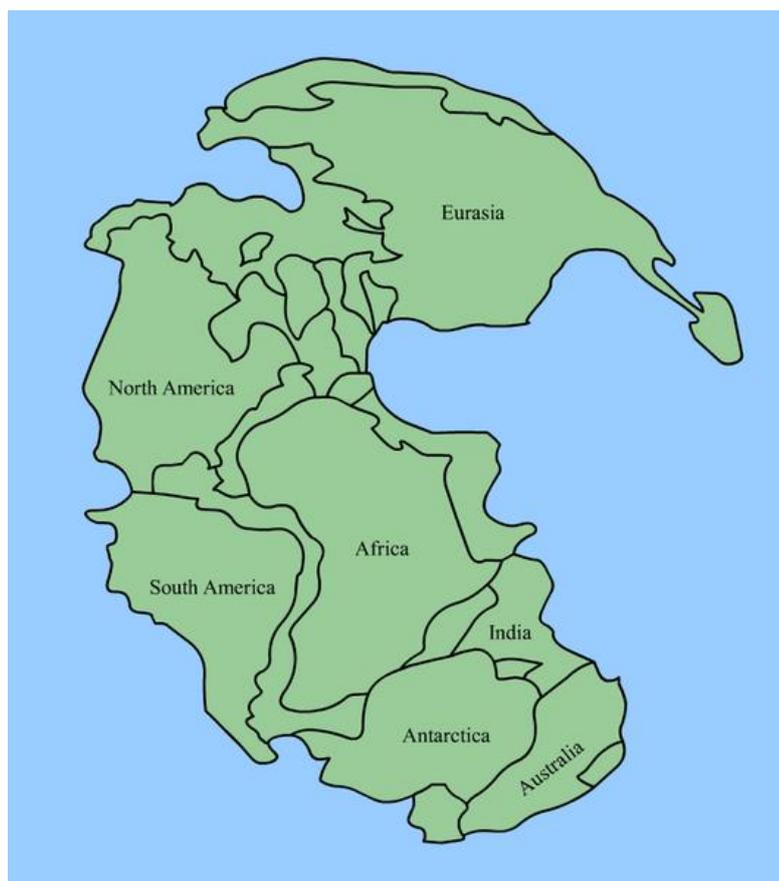


Рис.1. Материк Пангея в пермское время (Pangaea.siyatskyu.livejournal.com время обращения 20.10.2012).

Обширный Северо-Европейский бассейн распространяется с запада на восток на 1600 и с юга на север на 850 км, охватывая акваторию Северного моря, территорию Дании, Голландии, Германии, северо-западную часть Польши. Верхнепермская соленосная толща цехштейна с первоначальной мощностью соли 1000-1500 м перекрыта мощными (до 4-6 км) осадками мезозоя и кайнозоя.

Развитие отдельных солеродных бассейнов, как правило, происходит циклично.

Для Польско-Германской впадины (соль цехштейна Центральной Европы) выделяются шесть эвапоритовых циклов, отражающих периодичность наступления на сушу соленых океанических вод. Повторяющееся затопление изолированных участков бассейна сопровождалось накоплением в них осадков обломочных материалов. Повышение концентрации растворов солей приводило к образованию карбонатных и сульфатных пород, а затем – к накоплению мощных толщ каменной соли, содержащих прослойки калийных солей [9].

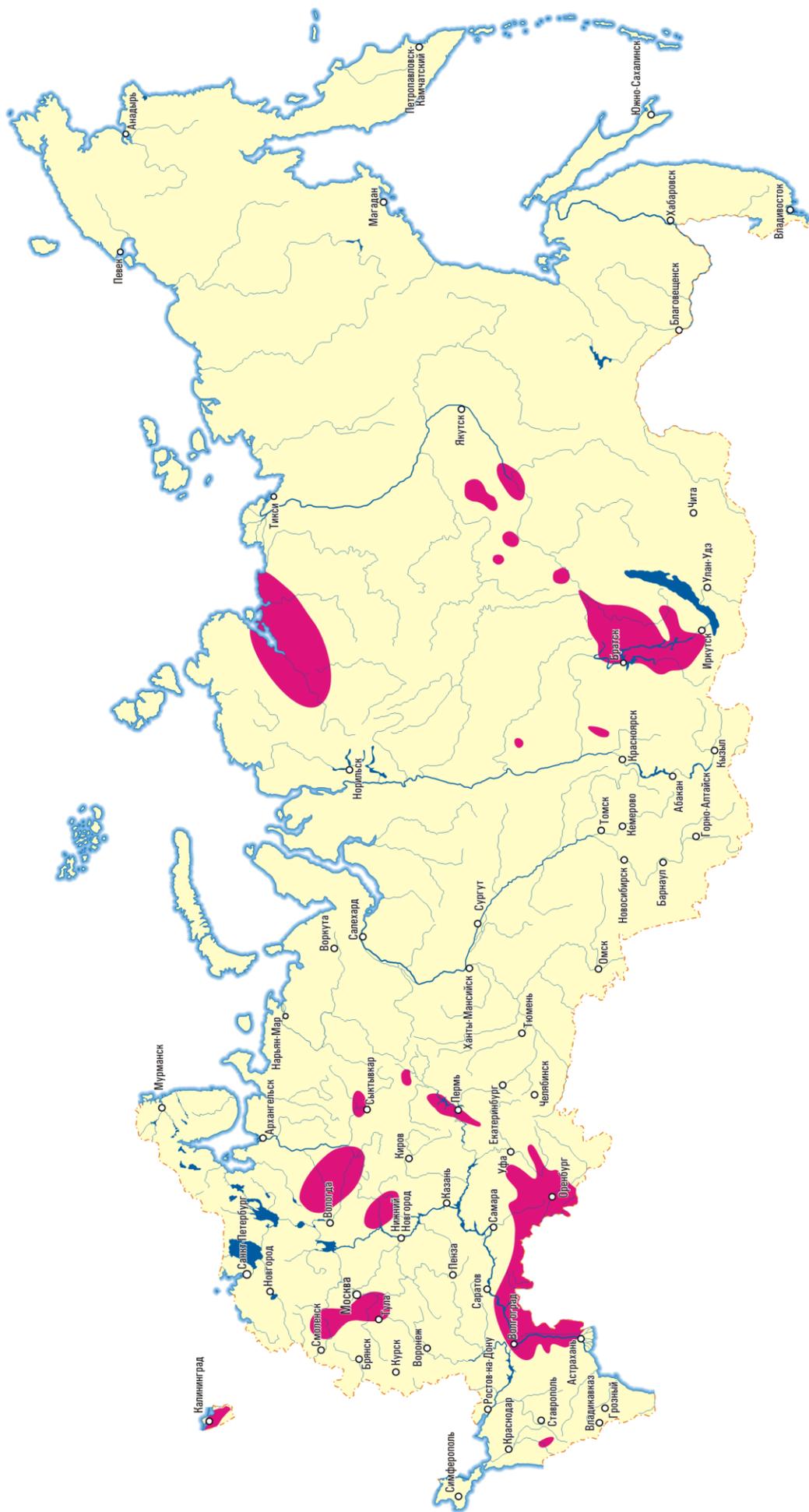


Рис. 2. Основные соленосные бассейны на территории Российской Федерации. Составлено по литературным данным.

1.1. Экранирующие свойства соляных формаций

Существование многочисленных соляных залежей в течение десятков и сотен миллионов лет свидетельствует о природной устойчивости этих формаций и наличии постоянных факторов, препятствующих разрушению водорастворимых минералов, в первую очередь галита. Более того, соленосные толщи являются надежными нефтегазоводоупорами и обычно разграничивают районы с различной гидродинамической обстановкой, выполняя функцию экрана [10].

Устойчивое и достаточно быстрое погружение дна солеродного бассейна после накопления хемогенной толщи осадков приводит к образованию в межсолевых и подсолевых отложениях водонапорной системы элизионного типа, при которой объемы поступающей в систему жидкости больше, чем удаляющейся из неё. Такая система водосбора способствует развитию в соляных отложениях рассолов с аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД). Соляной тектогенез, приводящий к локальным размывам соляных толщ, способствует активной разгрузке седиментогенных рассолов с АВПД, разрядке напряжений в водонапорной системе с преимущественно вертикальным движением подземных вод.

При этом боковая закрытость недр обеспечивается наличием в депрессионных зонах «тяжелых» рассолов с повышенным удельным весом, препятствующих внедрению в соляные толщи граничных «легких» вод инфильтрационного происхождения. Для вытеснения «тяжелых» рассолов, играющих роль гидравлических затворов, необходим высокий напор инфильтрационных вод, который не может быть обеспечен для равнинно-низменных рельефов размещения соленосных бассейнов.

Районы развития соленосных формаций, приуроченные к глубоким впадинам, благоприятны и являются поисковым признаком для нефтегазоаккумуляции, формированию месторождений нефти и газа. Парагенетическая связь соляных структур с месторождениями нефти и газа в значительной мере способствовало тому, что эти структуры хорошо изучены [11].

Особенно высок процент приуроченности к эвапоритовым бассейнам запасов газа и газоконденсата. К ним относятся Оренбургское, Астраханское, Карачаганакское и другие крупные месторождения на территории Восточно-Европейской низменности. Средне-Европейский соленосный бассейн является наиболее крупным нефтегазоносным районом Западной Европы. Нефтегазоносные отложения от триаса до нижнего миоцена связаны с Ирано-Пакистанским соленосным бассейном. Крупнейшие залежи нефти Саудовской Аравии и Кувейта расположены в крупном брахиоантиклинальном поднятии, залегающим над глубокопогруженными соляными телами. С соляными структурами связаны месторождения крупнейшего нефтегазового бассейна Мексиканского залива.

Установленная взаимосвязь объясняется рядом факторов структурно-тектонического, литологического и гидрогеохимического характера. Основным фактором является сходство геологических условий развития нефтегазоносных и соленосных бассейнов, наличие нисходящих движений земной коры. Значительное прогибание обуславливает генерацию, эмиграцию и аккумуляцию углеводородов в соленосных бассейнах. В условиях формирования бассейна может захораниваться значительное количество органического вещества, которое приносится океанической водой. Поскольку в эвапоритовые бассейны поступает огромное количество

океанических вод, то даже при относительно невысокой концентрации в них органического вещества его общие запасы могут быть значительными.

Благодаря наличию солей, залежи углеводородов, особенно газовые, сохраняются в течение длительного геологического времени. Глины, для сравнения, при высоких температурах и давлениях становятся хрупкими и трещиноватыми и не выполняют функции экрана. Для солей с глубиной увеличивается пластичность, что ставит их экранирующие свойства значительно выше глин и ангидритовых пород. Изолирующее влияние таких пластичных соляных покрышек четко прослеживается по сохранности газовых залежей в пермских отложениях Волго-Уральского региона [11].

1.2. Соляная тектоника

Соляные залежи имеют разнообразные формы залегания, часто не характерные для пород осадочного происхождения. Благодаря своим физико-механическим свойствам, каменная соль способна активно внедряться в перекрывающие её пласты, образуя формы и структуры, наблюдаемые для изверженных и магматических пород. Внедрения соляных тел в большинстве случаев стимулируются и контролируются тектоническими процессами, зависят от характера структур и подвижности пород окружающих толщ. Соляная тектоника получила собственное название – галокинез. Диапиризм – явление, при котором крупные массы каменной соли, механически выжимаются снизу вверх, деформируя окружающие породы.

Процессы и области развития галокинеза изучаются почти 150 лет, однако многие проблемы соляных структур всё ещё остаются дискуссионными [12]. Основной причиной формирования и развития процессов соляной тектоники считается сочетание низкой плотности и высокой пластичности эвапоритовых толщ [13].

Первичной формой залегания соляных пород, как и всех осадочных образований, является пласт (слой) – плоское геологическое тело, имеющее значительную площадь и сравнительно малую толщину (мощность), ограниченное поверхностями раздела от перекрывающего и подстилающего пластов [14]. Пластовые формы каменной соли залегают на сравнительно небольшой глубине в тектонически спокойных участках земной коры. Примером являются солевые пласты пермского возраста формации Саладо (Делавэрский бассейн), распространенные в США в штатах Нью-Мексико и частично Западного Техаса, Оклахомы, Колорадо и Канзаса. В соляном пласте формации Саладо был произведен первый подземный ядерный взрыв в каменной соли (1961 г.), а с 1999 года эксплуатируется подземное хранилище радиоактивных отходов WIPP [15]. На участке хранилища пласт каменной соли мощностью около 600 м перекрыт горизонтально залегающими известняками, глинами и песчаниками общей мощностью около 250 м.

Более распространены соляные породы, деформированные или перемещенные из мест своего первичного пластового залегания с образованием локальных вздутий, валов, крупных солянокупольных структур, «интрузивных» штоков и т.п. Крупнейшим в мире регионом развития соляной тектоники является Прикаспийская низменность, на территории которой известны более 1300 солянокупольных структур. С соляными структурами Прикаспия связаны нефтяные, газовые и газоконденсатные месторождения. Полученные обширные материалы буровых и геофизических исследований позволили составить представление об условиях формирования соляного «феномена» Прикаспийской низменности [16, 17].

Проявления соляной тектоники широко распространены в различных частях Земли – в районе Персидского залива, Северо-Германской впадины, на побережье Мексиканского залива, в Южной Австралии, Габоне, Канадском арктическом архипелаге. На территории бывшего Советского Союза – на востоке Украины, в Прикарпатье, Западной Белоруссии, Южном Таджикистане, в бассейнах рек Хатанги и Вилюя.

По сравнению с другими осадочными породами каменная соль имеет невысокую плотность ($\sim 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) и почти несжимаема. В случае перекрытия солей песками, алевритами, илами, последние в процессе диагенеза и погружения уплотняются до $2,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а плотность соли остается прежней. На глубинах около 1 км создаются условия для инверсии плотностей между солями и перекрывающими породами. Кроме того, существующие на больших глубинах температура и давление способствуют передвижению соляных масс, поскольку каменная соль в этих условиях становится пластичной и приобретает свойства, присущие вязкой жидкости.

На глубинах 5-6 км создаются наиболее благоприятные условия для диапиризма – всплывания и внедрения соляных масс в вышележащие осадочные породы. По мере приближения к поверхности падает температура, увеличивается вязкость соли и сходит на нет разность плотностей. Верхняя часть диапира останавливается, но его глубинные части продолжают давить на верхушку, которая, потеряв собственную подъемную силу, растекается в стороны от ядра, образуя характерные грибообразные формы.

Для галокинеза, как и для всех геологических процессов, существенным фактором для достижения уровня и форм развития соляной тектоники является время. Например, зарождение куполов Прикаспийской впадины началось около 250 млн. лет назад. В это время возникли различия в толщине первичного соляного пласта, мощности и плотности перекрывающих его пород, неровности блоков подсольевых пород. Предполагают, что 233 млн. лет назад в среднем триасе на всей территории впадины существовали выходящие на поверхность купола (рис.3) [16].

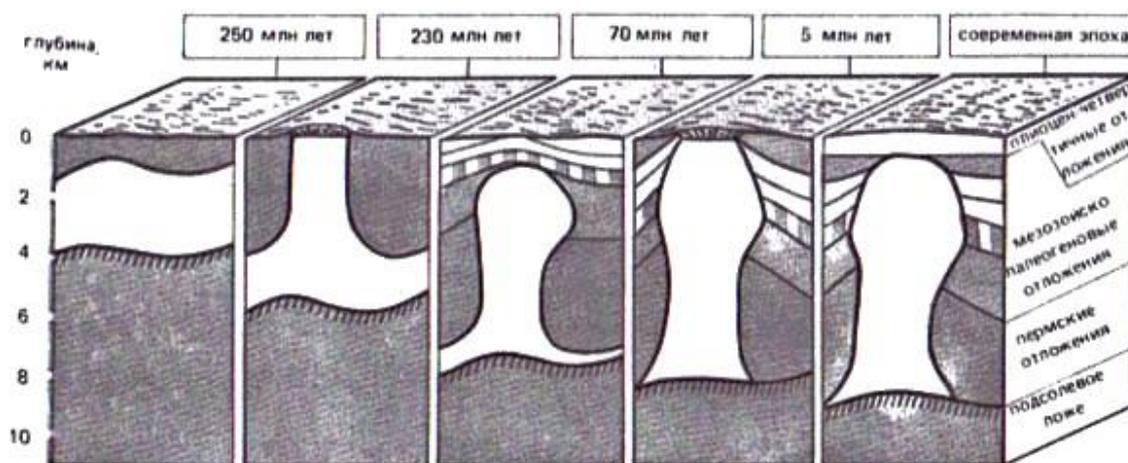


Рис. 3. Предполагаемая модель развития соляных куполов Прикаспийской впадины [16].

Рост куполов происходил неравномерно, с различной скоростью подъема соляных масс. Максимальный рост происходил между триасом и нижней юрой (~ 190

– 200 млн. лет назад), между юрой и нижним мелом (~ 140 – 150 млн. лет назад), а также в неогене (~ 23 млн. лет назад) [18].

В верхнем карбоне (~ 70 млн. лет назад) поверхность куполов была перекрыта морскими осадками и располагалась значительно ниже поверхностного уровня Земли. Подсолевое ложе к этому времени в центральных частях впадины опустилось с глубины 6 км до 8-9 км. В начале плиоцена (~ 5 млн. лет назад) соляные купола вновь вышли на поверхность. В настоящее время кровля большинства куполов южных и центральных районов находится на глубине 0,3 – 0,5 км и перекрыта осадочными песчано-глинистыми породами морских отложений Акчагыльской, Апшеронской, Бакинской, Хазарской и Хвалынской трансгрессии Пра-Каспия в дочетвертичное и четвертичное время.

Скорость современного роста большинства куполов в настоящее время составляет доли миллиметров в год. Одновременно существуют и более активные локальные структуры. Например, одно из крыльев купола Баскунчак поднимается со скоростью 0,5 мм/год, а купола Эльтон – около 1,3 мм/год [16].

На границах соляных куполов вмещающие осадочные породы деформируются, образуя зоны трещиноватости и повышенной проницаемости, создаются поля напряжений на контактах различных по динамическому состоянию пород. Такие зоны контакта выявляются методами структурно-геодинамического картирования, в частности – эманационного [19].

В процессе движения соляных массивов (куполов, штоков) внутри них образуются системы сбросов, зоны смятия различных масштабов – от крупных складок в диапировых структурах до мелкой плейчатой складчатости в соляных пластах (рис. 4, 5).

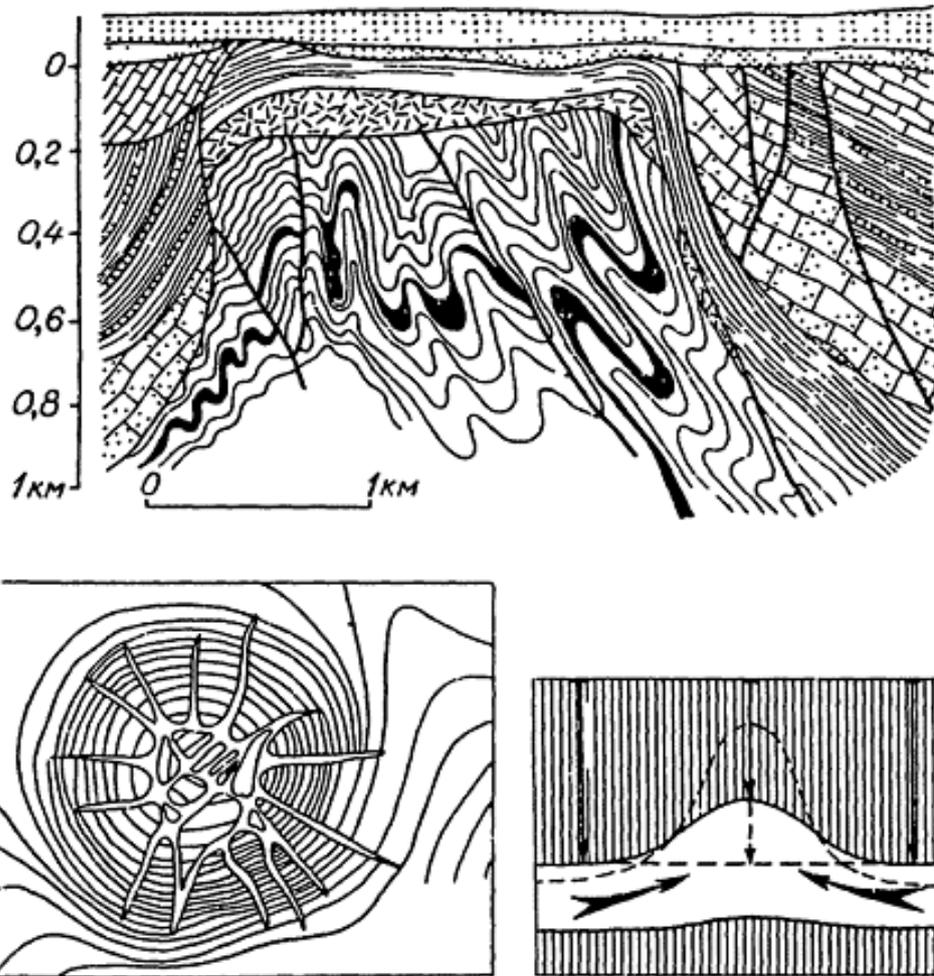


Рис. 4. Наверху – соляной купол в Клодове, Польша; в каменной соли, слагающей ядро, сложная дисгармоничная складчатость течения (по М. Ксенжкевичу, Я. Самсоновичу, 1965). Внизу слева – радиальная и концентрическая системы сбросов на структурной карте соляного купола Клей-Крик, побережье Мексиканского залива (по Л. Паркеру, А. МакДоуеллу), внизу справа – схема образования соляного купола (plate-tectonic.narod.ru/dislocationfold4photoalbum.html (время обращения 27.10.2012)).

В случае выхода соляного купола или штока в обводненную приповерхностную зону под воздействием грунтовых вод начинается растворение солей. На вершине соляного массива накапливаются водонерастворимые примесные минералы – сульфаты, карбонаты, глины и пр., которые образуют слой вторичных осадочных пород – кепрок (рис. 6). Породы кепрока защищают от дальнейшего разрушения апикальную часть соляных куполов и штоков. В кепроках солянокупольных структур побережья и прибрежной части Мексиканского залива разрабатываются месторождения самородной серы [20].

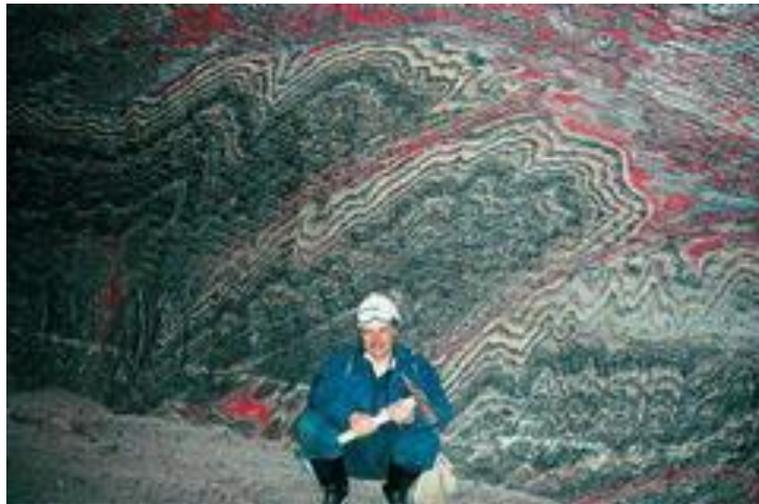


Рис.5. Мелкие пloyчатые складки в галит-сильвинитовых породах Соликамского калийно-магниевого месторождения (<http://perm-kray.ru/pam007-2.htm> время обращения 27.10 2012).

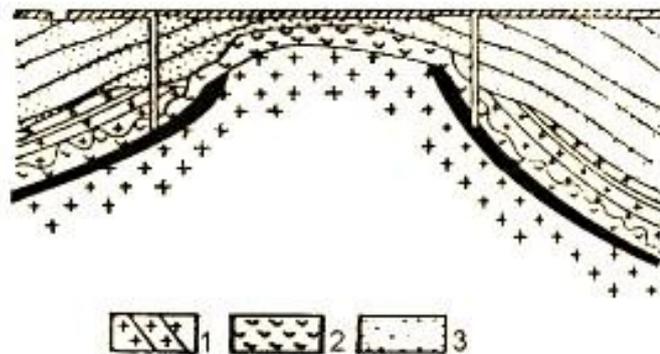


Рис.6. Соляной купол, перекрытый кепроком, состоящим из водонерастворимых примесных минералов солей (solyanie-kupola.html время обращения 02.11.2012):
1 – соляной массив; 2 – кепрок; 3 – надсолевые породы.

В безводных районах с сухим климатом соляные массы, достигнув поверхности, могут продолжать распространяться в горизонтальном направлении, образуя соляные глетчеры. Примером таких соляных «интрузий» служат диапиры гор Загрос в Южном Иране [21]. В течение последних



Рис.7. Соляные диапиры гор Загрос в Южном Иране (ZagrosMtns_SaltDome, время обращения 10.11.2012).

15 млн. лет тектоническая активность региона возросла вследствие столкновения Аравийской и Евразийской литосферных плит. Вдоль побережья Персидского залива соляные массы выдвигались на поверхность Земли, образуя возвышенности высотой более 1000 м. (рис. 7). Соляные глетчеры растекается со скоростью нескольких метров в год, т.е. несколько меньше, чем у большинства ледников. Проведенные исследования показали, что большую часть года соляные глетчеры неподвижны. Однако после сезонных дождей скорость движения соляных масс достигает 0,5 м в сутки.

Поступающие вдоль границ минеральных зерен тонкие пленки растворов снижают прочностные свойства соляного массива. Минерализованные водные растворы проникают по межкристаллическим пространствам, образуя в них мелкие кристаллы непрочного соляного «новодела». Для поддержания такой «динамической перекристаллизации» достаточно менее 0,1% воды. Не исключено, что такие процессы происходят не только в соляных глетчерах, но и на глубине, в погребенных соляных залежах [21].

1.3. Гидрогеология соляных формаций

Хорошая растворимость каменной соли (330 г/л при 20°C) исключает её совместимость с пресными водами. Во всех случаях подток пресных или слабоминерализованных вод на участки размещения соляных пород приводит к их растворению, разрушению массива с образованием соляного карста [22].

В зоне разломов Индерского соляного поднятия (Прикаспийская низменность), выведенной в область интенсивного водообмена на площади около 250 км², суммарный вынос хлористого натрия поверхностными водами достигает 200 тыс. тонн в год. Процессы выщелачивания и соляного карста наблюдаются в зонах обводнения крупных прорванных куполов и штоков Прикаспийской низменности, Днепровско-Донецкой впадины, Закарпатья и других районов распространения соляных формаций.

Наряду с природными причинами существуют многочисленные техногенные факторы, приводящие к разрушению и затоплению подземных горных выработок и участков соляных шахт. Основными причинами, приводящими к аварийным ситуациям на эксплуатируемых шахтным методом месторождениях каменной соли, являются [23]:

- вскрытие горными выработками верхних закарстованных и обводненных частей соляной залежи;
- вскрытие тектонических нарушений и обводненных боковых контактов соляного тела;

- недостаточная мощность предохранительных целиков;
- разрушение предохранительных целиков разведочными скважинами;
- разрушение целиков карстовыми процессами.

Одновременно сам факт существования многочисленных соляных залежей в течение десятков и сотен миллионов лет свидетельствует о том, что в природе существуют и распространены такие условия, при которых соляные формации с легкорастворимыми минералами стабильны. Более того, имеются примеры сохранения соляных залежей даже в зоне активной циркуляции вод, например, на Солотвинском месторождении и на Домбровском участке Калушского месторождения в Закарпатье. При этом на отдельных участках разрабатываемых солей отсутствует защитная глинисто-ангидритовая «шляпа» (кепрок) [22].

Анализ аварийных ситуаций на соляных шахтах показал, что растворение и карстообразование требуют одновременного выполнения ряда условий, и отсутствие хотя бы одного из них может исключить процесс в целом.

Пресные воды, вступившие в контакт с каменной солью, быстро насыщаются и становятся рассолами – жидкостью более тяжелой и более вязкой, чем вода. Плотность насыщенного рассола при 10 °С составляет 1,20 г/см³, вязкость – 2,60 спуаз (вязкость воды при этих условиях – 1,308 спуаз). Возникший на контакте с каменной солью рассол полностью теряет агрессивность и одновременно защищает породу от доступа воды и дальнейшего растворения. При борьбе с соляным карстом и проникновением пресных вод в подземные выработки используется не осушение, а подпитывание насыщенными рассолами водоносных горизонтов [22].

Природные и техногенные гравитационно-устойчивые водные системы создают вертикальную и боковую закрытость соляных залежей. Для вытеснения тяжелых рассолов необходим достаточно высокий напор инфильтрационных вод, который обычно не обеспечивается гипсометрией таких равнинных районов, как Прикаспийская или Северо-Германская низменности. Нельзя считать случайными древние возрастные метки рассолов, полученные с использованием изотопных отношений благородных газов для этих соленосных бассейнов – от 3-х до 40 млн. лет [24, 25].

В гидрогеологическом разрезе соляных формаций выделяют три основных типа вод, различающихся по происхождению, составу и положению относительно соляной залежи [26]:

- воды надсолевых пород, присутствующие в породах, перекрывающих соляные формации (их образование рассмотрено ранее);
- внутрисолевые рассолы прослоев или замкнутых линз с аномально высоким давлением;
- воды и рассолы подсолевых пород.

Внутрисолевые рассолы – высокоминерализованные растворы обычно не натрия, а кальция и магния, при минерализации свыше 300 г/л. Для купола Челкар в Прикаспийской низменности минерализация составляет 450 г/л. Наблюдаются высокие концентрации многих характерных элементов (табл. 2) [26].

Таблица 2. Концентрации характерных элементов внутрисолевых рассолов [26]

Элемент	Концентрации, мг/л
I	1 – 47
Br	1340 – 4000
B	215 – 400
Sr	до 300
K	10 000 – 60 000
Rb	10 – 50

Как правило, внутрисолевые крепкие рассолы – маточная рапа – заключены в виде «запечатанных» линз, что свидетельствует о закрытом состоянии соляного массива, по крайней мере, на участках их присутствия в соленосной толще.

Воды подсолевых пород имеют различное происхождение и состав. Обычно это воды глубокого залегания. Необходимо отметить, что сами соляные формации являются хорошими водо- и газоупорами, препятствующими обмену или смешению надсолевых и подсолевых вод. Например, в районе Астраханского свода в подсолевых карбонатных породах каменноугольного возраста присутствуют низкоминерализованные воды (60 – 110 г/л), которые полностью изолированы от высокоминерализованных надсолевых рассолов. Исследования, проведенные на территории Прикаспийской низменности, показали, что её галогенная толща является мощным региональным водоупором – покрывкой, разделяющей водоносные комплексы региона на два гидрогеологических этажа [26].

1.4. Строительство подземных сооружений в соляных толщах

Каменная соль обладает уникальными свойствами, позволяющими сооружать в этих породах подземные выработки и крупные камеры, не требующие креплений. Создание горных выработок с сечением 900 м² и протяженностью 100 м, трудно реализуемое для других горных сред, в каменной соли не является проблемой в условиях нормальной эксплуатации соляного массива даже со сложной тектонической структурой [27]. Камерная система добычи без крепи позволяет эффективно применять различные технологии и современные методы горнопроходческих работ.

Выработанные подземные пространства соляных шахт сохраняются в течение сотен лет и используются для различных целей. В отечественной и мировой практике накоплен богатый опыт строительства и эксплуатации в соляных толщах подземных сооружений различного целевого назначения – хранилищ жидких углеводородов, химических продуктов, газов, разнообразных складских помещений, лечебных учреждений и пр.

Подземные лечебные учреждения располагают в выработках отработанных соляных шахт. Выработки большого поперечного сечения (камеры) приспособляются под палаты для больных, лечебные кабинеты и т.п. Целесообразность подземных медицинских учреждений обусловлена постоянством давления, влажности и температуры воздуха, отсутствием бактериальной флоры, солнечной радиации, шума, естественной ингаляцией (благодаря насыщенности среды химическими

элементами), ограниченным воздействием магнитного поля. Это создаёт микроклимат, благоприятный для лечения, в частности, лёгочных заболеваний.

В СССР функционировала крупная подземная лечебница для больных бронхиальной астмой, размещенная на глубине 200 м в соляном руднике около поселка Солотвина в Закарпатье. Лечебно-оздоровительные, экскурсионно-познавательные учреждения на базе отработанных соляных шахт существуют во многих странах – Германии, Польше, Румынии, Украине, Беларуси, Армении и др. (рис. 8).

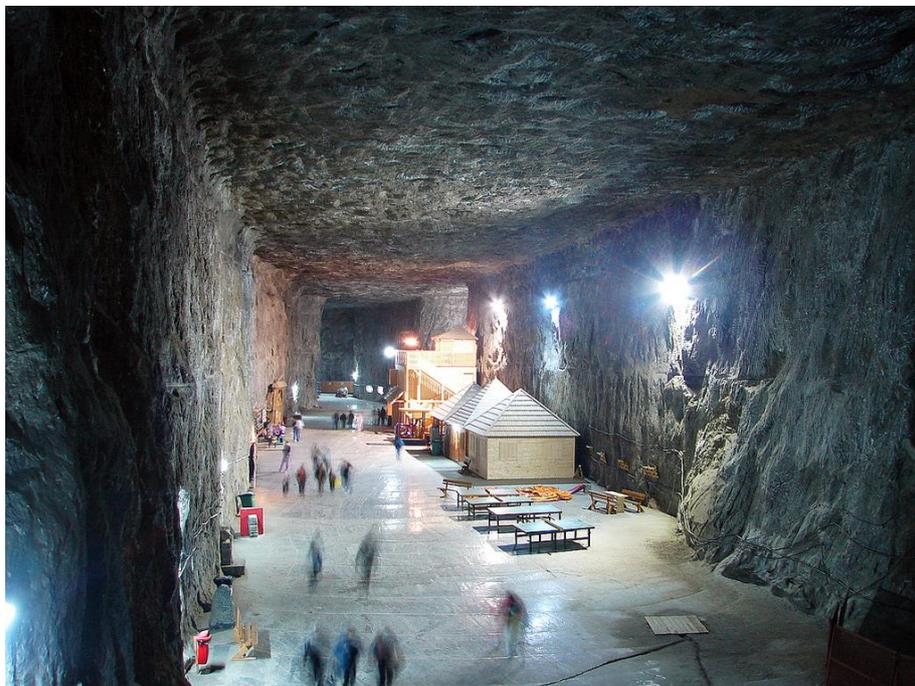


Рис. 8. Курортный комплекс в соляной шахте, Прайд (Румыния) constanța.info/post179045416/ (время обращения 11.11.2012).

По определяющим факторам – технологичности, дешевизне, экологической целесообразности, сейсмической устойчивости и благоприятным для обитания климатическим условиям соляные толщи наиболее перспективны для развития подземного строительства [28].

В 1976 г. Комиссия Государственного комитета по науке и технике предложила рассмотреть для захоронения твердых промышленных отходов несколько соленосных бассейнов площадью от 0,4 до 600 тыс. км² [29]. Основным критериям строительства – мощности и конфигурации соляного тела – на территории РФ соответствуют следующие районы распространения каменной соли:

- Ангаро-Ленский соленосный бассейн;
- Соленосный бассейн Березовской впадины;
- Соленосный бассейн Пясинско-Хатангского прогиба;
- Подмосковный соленосный бассейн;
- Двинско-Сухонский соленосный бассейн;
- Печеро-Камский соленосный бассейн;
- Волго-Уральский бассейн, охватывающий на территории РФ Оренбургскую, Самарскую, Саратовскую, Волгоградскую, Астраханскую области;
- Калининградский соленосный бассейн.

В соляных толщах сооружение подземных хранилищ возможно различными

способами, в том числе и камуфлетными взрывами. Наиболее распространенным методом, отвечающим технико-экономическим и экологическим требованиям, является подземное растворение каменной соли через буровые скважины. Для создания емкостей пригодны все морфологические типы соляных залежей: пластовые, линзообразные, куполовидные и штоковые. Основными условиями для выбора участков для создания подземных камер считаются [30, 31]:

- максимальная монолитность толщи;
- отсутствие зон трещиноватости и карста;
- отсутствие пропластков высокопроницаемых и рыхлых пород;
- отсутствие прослоев легкорастворимых солей;
- минимальная толщина прослоев несоляных пород;
- малое содержание в солях водонерастворимых минералов, позволяющее производить выщелачивание камер и удаление рассолов.

Разработано несколько технологических режимов подачи растворителя (Рис. 9, [32]). Соляные хранилища целесообразно сооружать в мощных пластах каменной соли (50–250 м), расположенных на значительной площади (более 10 км²). Соляные хранилища больших объёмов (до 300 тысяч м³) сооружают в виде эллипсоидов, закуполненных цилиндров и других форм, устойчивых в условиях горного давления. Объём единичной камеры в соляном куполе может достигать 1,5 млн. м³, при высоте подземной емкости около 200 м [28].

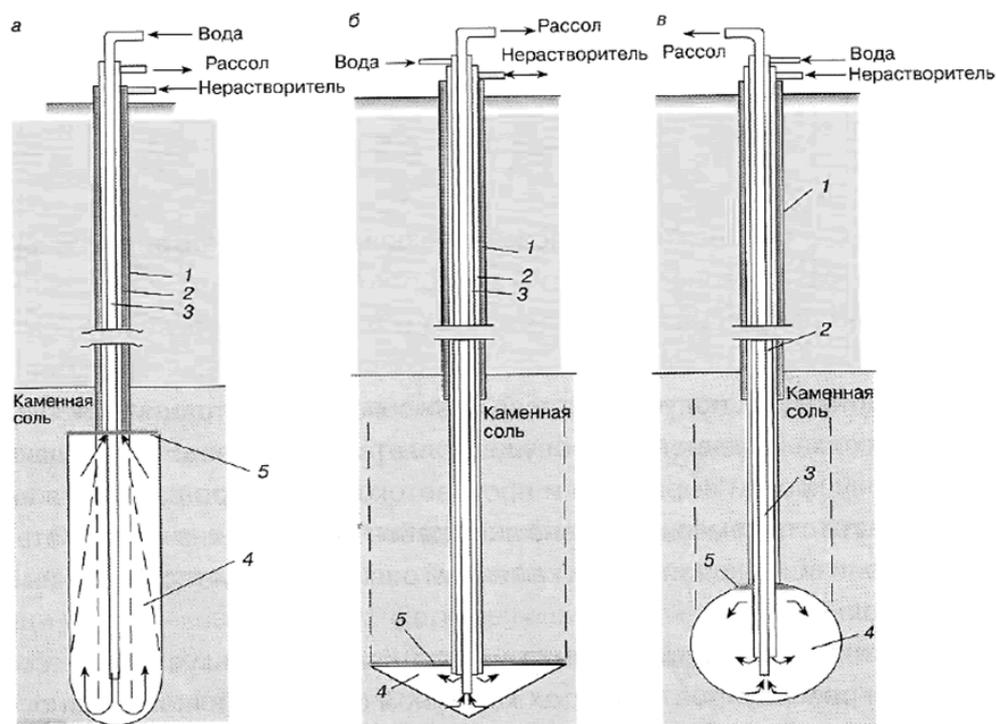


Рис.9. Технологические режимы подачи растворителя при строительстве выработок-емкостей в каменной соли: *а* – прямоточный; *б* – противоточный; *в* – сближенный противоток. 1 – обсадная колонна; 2 – внешняя подвесная колонна труб; 3 – центральная подвесная колонна труб; 4 – выработка-емкость; 5 – нерастворитель [32].

Массив каменной соли, в котором создаётся соляное хранилище, является упруговязкой непроницаемой средой, обладающей высокой прочностью (15-

35 МПа). Результаты экспериментальных испытаний показали, что по мере роста давления проницаемость каменной соли снижается и при давлении 200 атм. приближается к нулю. В соляных массивах такое давление создается на глубине ~ 900 м. При снятии давления проницаемость восстанавливается не более чем на одну треть от первоначальной величины [33]. Высокие изолирующие свойства залежей каменной соли позволяют осуществить хранение в подземных полостях гелия – газа с исключительно высокой миграционной способностью [34].

Для сооружения подземных резервуаров на территории Российской Федерации на базе специальных методик выбора определены следующие перспективные соленосные бассейны, районы и площади [35]:

Ангара-Ленский соленосный бассейн, расположенный в верховьях рек Лены и Ангары, в южной части Иркутской области и Усть-Ордынского Бурятского автономного округа (Сибирский федеральный округ). Соленосной толщей являются отложения усольской свиты мощностью 270-1100 м. Глубина залегания кровли – от 680 до 1600-2000 м. В гидрогеологическом отношении бассейн представляет артезианскую область, сложенную мощной толщей осадочных пород. Мощность верхнего водоносного (пресного) горизонта составляет около 300 м. Ниже расположены горизонты засоленных вод и рассолов. В качестве наиболее перспективных следует выделить Усольское и Кутуликское месторождения, залегающие на глубинах 680-960 м, с мощностью залежи от 440 до 800 м.

Соленосный бассейн Березовской впадины расположен в юго-западной части Республики Саха (Якутия), в нижнем течении р. Олекмы (Дальневосточный федеральный округ). Выделены для строительства Усть-Бирюкское, Наманинское, Олёкминское и Солянское месторождения с глубиной залегания солей 236 – 541 м. и мощностью пластов 51 – 350 м.

Соленосный бассейн Пясинско-Хатангского прогиба расположен в пределах Таймырской низменности между реками Енисеем и Анабаром (Сибирский федеральный округ). Нижнедевонские соляные породы залегают в виде штоков сложной диапировой структуры, перекрытых образованиями обводненного кепрока. Мощность штоковых залежей позволяет сооружать подземные резервуары на глубинах 200-300 м. Наиболее перспективны Нордвиковское и Кожевниковское месторождения с мощностью штоков свыше 500 м.

Подмосковный соленосный бассейн расположен юго-западнее Москвы (Центральный федеральный округ). Каменная соль среднего девона (живетского яруса) образует пластовую залежь мощностью от 5 до 62 м. Глубина залегания кровли увеличивается с юга на север от 740-836 м в вяземской и до 855-1080 м в тульско-серпуховской частях бассейна. В кровлевой части соляные пласты изолированы от вышележащих водносных горизонтов толщей монолитных ангидрит-доломитовых пород мощностью 20-40 м. В подошве соляного пласта залегают плотные водонепроницаемые доломиты и глины. Условиям сооружения хранилищ отвечают 15 месторождений, залегающих на глубинах 800-1000 м и имеющих мощность 27-55 м.

Двинско-Сухонский соленосный бассейн расположен в верховьях р. Северная Двина (Северо-Западный федеральный округ). Залежи каменной соли приурочены к отложениям нижней перми, которые в нижней своей части сложены доломитами, а в верхней – ангидритами и гипсами с прослоями доломитов и каменной соли. Кровля соленосного горизонта залегает на глубинах 255-350 м, мощность составляет 30-300 м. Гидрогеологические условия сложные. Требованиям строительства отвечают месторождения Сереговское, Шангалинское и Сухонское.

Печеро-Камский соленосный бассейн (Северо-Западный и Приволжский округа). Солевые формации приурочены к иреньскому горизонту кунгурского яруса нижней перми. Между двух зон преимущественного развития галитовых пород находится зона калиево-магниевых солей, представленная пластами мощностью 0,8-7,5 м, переслаивающимися с пластами каменной соли и засоленных глин. Глубина залегания кровли соленосной толщи варьирует от 100 м в южной части бассейна и до 770 м в районе г. Соликамска. Мощность толщи изменяется от 80 до 300 м, увеличиваясь в центральной части бассейна.

Критериям сооружения подземных резервуаров соответствуют месторождения нижней зоны: Верхнекамское, Верхнечусовское, Шумковское и Голубятское, в которых глубина залегания солей составляет 90-350 м, а мощность – от 45 до 360 м.

Волго-Уральский соленосный бассейн расположен в пределах юго-западной части Республики Башкортостан, Оренбургской, Самарской, Саратовской, Волгоградской и Астраханской областей (Приволжский и Южный федеральные округа). Крупный соленосный бассейн нижнепермского возраста разделяют на три района: Предуральский прогиб, часть Русской платформы и районы, примыкающие к Прикаспийской низменности. В северной части Предуральского прогиба каменные соли составляют около 10% разреза, а основную его часть представляют глины, мергели и песчаники. Глубина кровли солевых пород составляет от 20 до 150 м в сводах соляных куполов, и увеличивается до 400-600 м на погруженных частях куполов. В платформенной части выделяются две соленосные толщи – кунгурского и казанского ярусов. Кунгурские соли представлены отдельными пластовыми залежами ангидритов и каменной соли. Их мощность изменяется от 150-200 м до 1-2 тыс. м. Глубина залегания – 300-1100 м. В пределах территории Прикаспийской низменности приближение соляных масс к поверхности связано с ярко выраженной солянокупольной тектоникой. Глубина залегания куполов в Саратовской области 210-280 м, в Волгоградской – свыше 1000 м. Ядра куполов сложены почти чистым галитом, содержание примесных водонерастворимых минералов обычно не превышает 2-3%. Для сооружения подземных резервуаров соответствуют требованиям критериев большое число месторождений каменной соли этого бассейна.

Давыдовская соленосная площадь находится севернее г. Нижний Новгород. Соли нижней Перми (артинский ярус) занимают площадь около 4 000 км². Глубина залегания кровли 370-450 м. Содержание галита составляет от 40 до 95%. Соленосная толща не обводнена, но выше, в отложениях казанского яруса присутствует мощный минерализованный водоносный горизонт. На Давыдовском месторождении глубина кровли солей варьирует от 370 до 495 м, мощность солевого пласта, залегающего между плотными низкопроницаемыми ангидритовыми породами, составляет всего 1,8 - 30 м.

Калининградский соленосный район представляет краевую северо-восточную часть крупного Польско-Германского пермского соленосного бассейна. В центральной части района максимальная мощность соляного пласта составляет 150-180 м. В южном и восточном направлении происходит резкое сокращение мощности до 18-30 м. Глубина залегания соленосной пачки – 675-1045 м.

В Зеленоградском районе Калининградской области создается крупное подземное хранилище газа [36]. Методом размыва планируются строительство и эксплуатация 14 подземных резервуаров объемом 400 тысяч м³ каждый в интервале глубин 800-950 м. В результате проведения работ первой очереди строительства в 2009 г. создан водорассольный комплекс. Осенью 2011 г. завершены работы по

второму пусковому комплексу – сооружению компрессорной станции и подводящего газопровода к площадкам хранилищ от газопровода «Минск – Вильнюс – Каунас – Калининград». В сентябре началась закачка газа в первые три емкости.

Северо-Кавказский соленосный бассейн приурочен к северной части Дагестана, к району р. Малой Лабы Краснодарского края (Южный федеральный округ). Изучены два пласта каменной соли среднеюрского возраста с мощностью 47 и 98 м, полого падающие на северо-восток под углом 7-9°. Первый пласт залегает на глубине 350 м, второй – на глубине 417 м. Содержание галита в них составляет 87-93%. Наиболее перспективно Шедокское месторождение юго-восточнее г. Майкопа.

1.5. Минералы хемогенных пород

Главные минералы соляных (хемогенных) пород – группы галита, ангидрит и группа гипса, группа кальцита и др. широко распространены, детально изучены и их свойства приведены в научно-справочной литературе [37-38].

1.5.1. Галит

Галит (от греч. *hals* – соль) – хлористый натрий, каменная соль.

Химический состав – NaCl, теоретический состав: Na – 39,34 %, Cl – 60,66 %. В виде примеси содержит в небольших количествах другие хлористые и сернокислые соли, ангидрит, окислы железа и терригенные, обычно глинистые частицы.

Практически мономинеральные галитовые породы (каменная соль) без каких-либо промежуточных обогатительных операций используются в качестве продукта питания. Например, каменная соль Илецкого месторождения (Оренбургская область) при добыче горнодобывающими комбайнами содержит 98,8 % NaCl [39].

Сингония галита кубическая. Кристаллическая структура имеет типичную ионную связь. В её основе – решетки двух гранецентрированных кубов, вставленных друг в друга. Ионы Na^+ и Cl^- поочередно располагаются в углах малых кубов. Координационные числа для обоих ионов равны 6, т.е. каждый отрицательный ион хлора окружен шестью положительно заряженными ионами натрия, и наоборот (рис. 10) [37].

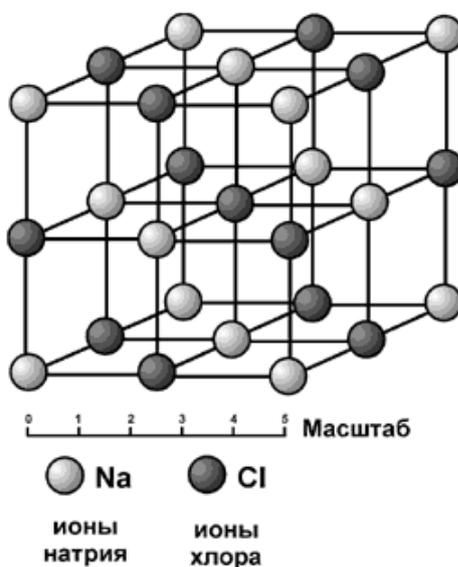


Рис.10. Кристаллическая структура галита [37].
Масштаб в ангстремах.

Кристаллы галита имеют обычно кубическую форму. Соль-самосадка наблюдается в виде кристаллически-зернистых корок или пластин на дне солеродных бассейнов. Друзы кристаллов галита иногда достигают значительных размеров.

В процессе метаморфической собирательной перекристаллизации образуются кристаллические массы чистого галита с необычайно крупными размерами спайных плоскостей, до 50 см (рис.11).



Рис. 11. Кристаллы каменной соли из шахты Величка (Польша) Музей естественной истории (Вена), geo.web.ru (время обращения 17.11.2012).

В подземных горных выработках могут образовываться корки с натечной поверхностью и сталактитовые формы первоначально скрытокристаллических, а со временем перекристаллизованных крупнозернистых агрегатов.

Чистые массы галита прозрачны и бесцветны или имеют белый цвет. Окраска обусловлена присутствием различных красящих пигментов. Серая окраска связана с включениями мелкодисперсных глинистых частиц. Коричневые и желтые тона, как правило, обусловлены примесями соединений железа, например, мелкого игольчатого гематита. Бурая и черная окраска, которая исчезает при нагревании галитовой породы, связана с присутствием органического вещества.

Синяя, фиолетовая и исчезающая на свету желтая окраски вызываются воздействием радиоактивного излучения (рис.12). Основным природным источником излучения служит ^{40}K , что подтверждается связью окраски галита с присутствием калиевого минерала – сильвина KCl [40].

Характер и интенсивность окрашивания зависят от параметров облучения и от особенностей структуры и состава галита. Установлено, что радиационная окраска зависит от следующих причин:

- степени деформирования решетки и наличия в ней тех или иных напряжений;

- количества и характера элементов-примесей в облучаемом галите, например, в голубой соли отмечалось повышенное содержание Са. В фиолетовой – Си;
- скорости роста окрашиваемых кристаллов, поскольку синяя окраска часто распределяется в кристаллах неравномерно в виде зон, параллельных граням куба.



Рис. 12. Образец синей каменной соли. Соляная шахта Морслебен, Страсфуртский массив, Германия. Натуральная величина.

Для получения синего галита в плотно закрытом сосуде нагревают смесь металлического натрия и хлорида натрия [37]. Металл растворяется в соли. При этом атомы натрия проникают в кристаллическую решетку, состоящую из ионов Na^+ и Cl^- , и «дообраивают» ее, превращаясь в катионы натрия. Освободившиеся электроны размещаются в тех узлах кристаллической решетки, где полагалось бы находиться хлорид-анионам. Такие необычные узлы решетки, занятые электронами, называют вакансиями, или F-центрами (от немецкого слова Farbe – цвет) При охлаждении кристалла некоторые F-центры объединяются, образуя ассоциаты, включающие от 10 до 1000 атомов натрия. В этом и состоит причина появления синей окраски.

На спектрах поглощения синих кристаллов главный максимум находится в интервале 610-650 нм. Этот максимум обусловлен поглощением света коллоидными частицами металлического натрия, размеры которых варьируют от 50 до 80 нм. Получены также прямые доказательства присутствия в решетке синего галита коллоидных металлических частиц [41].

Блеск галита стеклянный, на поверхности выветрелых образцов жирный.

Твердость по минералогической шкале 2, микротвердость 18-22 кг/мм².

Галит хрупкий минерал, но при нагревании становится пластичным. В горячем рассоле его пластины можно согнуть руками.

Спайность весьма совершенная по кубу (см. рис. 11). Излом раковистый.

Плотность чистого галита 2,173 кг/м³, плотность галитовой породы (каменной соли) – 2100-2200 кг/м³ [32].

Температура плавления 801°C, температура кипения – 1413°C.

Пористость редко превышает 2-3% и связана с присутствием газовой-жидких микровключений.

Эвапоритовая группа пород, к которой относится каменная соль, в отличие от других групп, образуется в результате кристаллизации солей из перенасыщенных водных растворов. Рост кристаллов и формирование химического осадка сопровождается захватом в твердую фазу исходного раствора и растворенных в нем газов. В дальнейшем, на стадии седиментации, диагенеза, метаморфизма и галокинеза происходит перераспределение и изменение морфологии и состава газовой-жидких флюидов, образование, в частности, трёхфазных газовой-жидко-твердых включений. Включения в седиментационных минералах несут в себе большой объем информации относительно состава исходной рапы, температурных условиях солеобразования, глубине солеродного бассейна, основных направлениях течения соляных масс и пр.

В каменной соли присутствуют два типа газовой-жидких включений – внутрикристаллические и межкристаллические. Они различаются по морфологии, происхождению, а также по своему функциональному значению, которое эти включения имеют в геотехнологических системах подземной изоляции радиоактивных отходов [42].

Внутрикристаллические включения в галите представлены замкнутыми микроростками округлой или кубической формы («отрицательные кристаллы») размерами $10^{-5} - 10^{-7}$ мм³. Содержат обычно жидкую и газовую фазы, но могут присутствовать и твердые частицы, микроростки (рис. 13, 14). В жидкой фазе присутствуют катионы калия, магния, а также сульфат-ион. Газы представлены смесью диоксида углерода, азота и метана. В различных соляных залежах один из этих газов является преобладающим. Давление газов внутри включений зависит от условий формирования и развития соляной формации и может достигать десятки и более атмосфер (более 1 МПа) [43]. Присутствием таких включений объясняется характерное взрывное растрескивание каменной соли при нагревании.

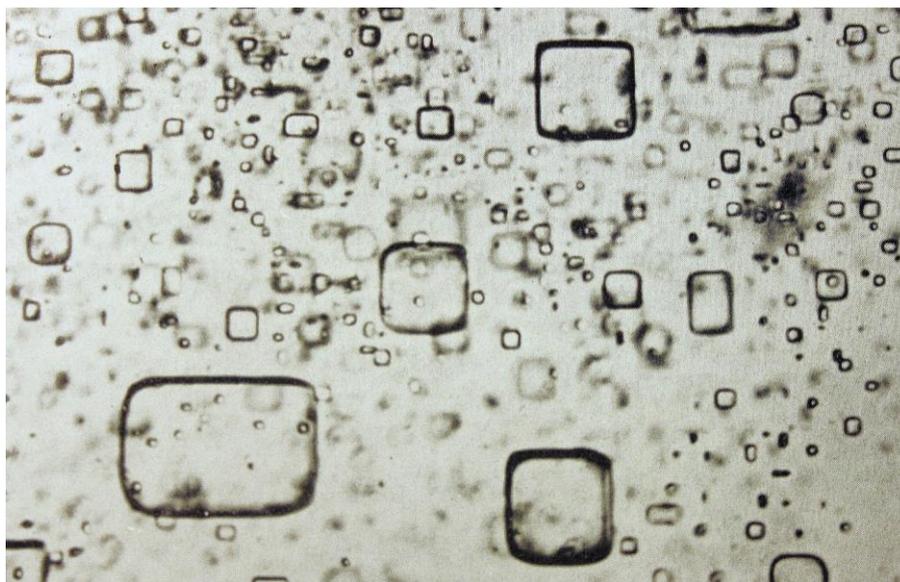


Рис. 13. Расположение жидких включений на растущей грани седиментационного галита из современных соляных озер. Ув. 450.
Алжир, Сахарский Атлас [43].

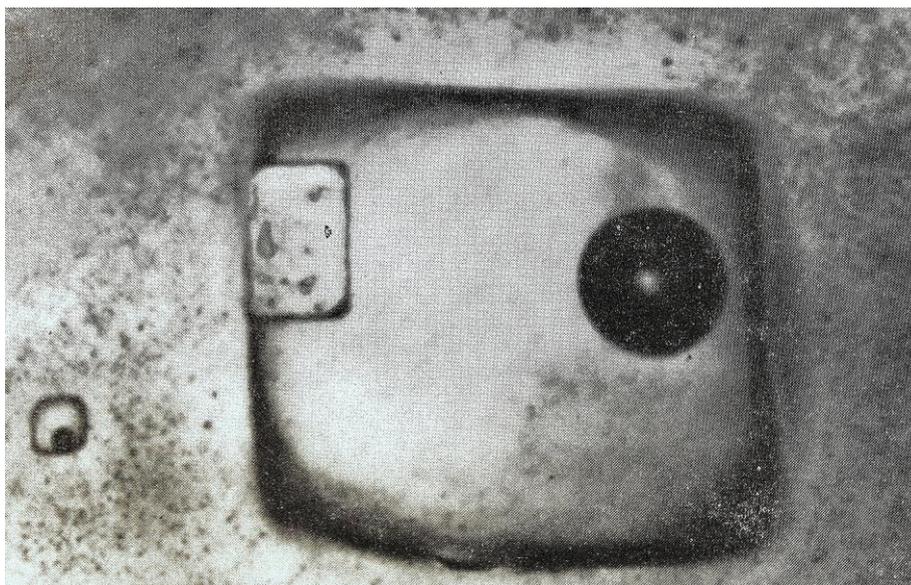


Рис. 14. Трехфазовое (раствор + газ + галит) жидкое включение. Ув. 400. Припятская впадина, Старобинское месторождение [43].

Внутрикристаллические включения различных типов связывают с определенными стадиями образования и развития соляных формаций [43, 44].

На стадии образования осадка (седиментогенеза) формируются микроскопические включения (менее 1-3 мкм), локализованные вдоль зон быстрого роста скелетных кристаллов.

При преобразовании соляных пород (диагенезе) происходит частичная перекристаллизация галита, включения размером до нескольких миллиметров, которые локализуются в краевых зонах кристаллов и вдоль их границ.

При дальнейшем уплотнении каменной соли под влиянием усиливающегося давления (катагенеза) происходит перекристаллизация пород, укрупнение включений, локализация их вдоль реликтовых зон роста. При деформациях часть включений может вытесняться на плоскости спайности.

Многостадийное развитие внутрикристаллических включений, происходящее в различных термобарических условиях, не позволяет надежно определять температуру образования галита по температуре гомогенизации газовой-жидких включений.

В термоградиентном поле внутрикристаллические включения перемещаются в сторону источника тепла. Происходит преимущественное растворение более нагретой стенки микрополостей и нарастание галита на менее нагретой, что приводит к своеобразной «трансляции» включений [45, 46].

Явление массопереноса жидкости осложняло условия захоронения в каменной соли тепловыделяющих отходов и привлекло внимание специалистов, поскольку рассолы микровключений со временем могут войти в контакт и вызвать коррозию металлических контейнеров с ВАО [47].

Экспериментальные наблюдения включений, движущихся под действием градиента температур в соляной кристаллической среде, позволили сделать следующие выводы:

- 1) Под действием градиента температур жидкие включения мигрируют в горячую область образца, причем в процессе миграции они приобретают форму пластинок, ориентированных перпендикулярно градиенту температур;
- 2) Скорость движущегося включения пропорциональна его объему, в результате чего происходит коалесценция включений – большие включения догоняют и сливаются с включениями меньших размеров;
- 3) Наиболее крупные включения (более 100 мкм) нестабильны в температурном поле, их развал приводит к образованию включений меньшего размера;
- 4) Существует пороговое значение градиента температуры, зависящее от размера включения. Последние способны передвигаться лишь в том случае, если градиент температур превышает это пороговое значение.

В условиях лабораторного эксперимента изменения структуры каменной соли начинаются при сравнительно невысоких температурах. В образцах каменной соли из соляного штока Западного Азгира (примесь карбонатов и глин) в интервале 20-100 °С происходит гомогенизация газовой-жидких внутрикристаллических замкнутых включений, а также их движение к источнику тепла [42]. Более заметные изменения наблюдаются в интервале температур 300-350°С, при которых происходит взрывное вскрытие (декрипитация) замкнутых газовой-жидких включений, влаго- и газовойделение, разложение примесей полигалита и карналлита, окисление органики. При более высоких температурах (400-500°С) начинают образовываться газы термохимических реакций – основного процесса газовойделения, связанного с разложением карбонатов.

В солянокупольных структурах Большого Азгира (примесь ангидрита) существенных минералого-структурных изменений не происходит вплоть до температур 200-250°С. По-видимому, эта величина является максимальной для сохранения стабильности среды при захоронении тепловыделяющих отходов [42].

В случае захоронения высокоактивных отходов в водных растворах включений могут происходить радиолитические процессы, что осложняет ситуацию и может сказаться на условиях подземной изоляции [48].

Природные радиолитические процессы происходят на участках скопления радиоактивных элементов. Такие условия возникают в пределах урановой и ториевой минерализации, в подземных растворах, содержащих радий, на месторождениях калийных солей и т.д. Геохимические эффекты, связанные с радиолитизмом подземных вод, наиболее отчетливо проявляются в восстановительной обстановке зон затрудненного и весьма затрудненного водообмена. Для того, чтобы природные радиолитические процессы давали заметный эффект, необходимо поглощение водой доз ионизирующего излучения, достаточных для ее радиолитического разложения. Максимально возможный выход продуктов разложения воды в результате ионизации и возбуждения составляет около 12 молекул на 100 эВ, что составляет около 2,4% от исходного количества воды. Продукты радиолитизма воды, реагируя с химическими элементами, находящимися в низких степенях окисления, будут окислять их, восстанавливая те, которые находятся в высших степенях окисления. В результате должны измениться подвижность элементов. т.е. характер миграционных процессов. Экспериментально установлено, что значительная часть радиолитического кислорода расходуется на различные окислительные процессы. Примером скопления радиолитического водорода служат месторождения калийных солей Страсбургского, Соликамского, Березниковского и других месторождений. Со времени своего образования (~ 270 млн. лет) содержание водорода в калийных со-

лях достигало 30-50% и было приурочено к пластам карналлита [48]. Радиолитическое разложение органического вещества, растворенного в воде, переводит его в углекислый газ.

Дальнейшие лабораторные исследования показали преувеличение масштабов возможной миграции рассолов при захоронении тепловыделяющих РАО. Эксперименты по нагреву каменной соли, примыкающей непосредственно к стенкам контейнеров с температурой 100°C, ограничили до ~ 15 см зону перемещения газовой-жидких включений, из которой возможно поступление в камеру захоронения небольшого количества рассолов. Измеримых радиолитических эффектов в соли не наблюдалось. [49].

Полученные результаты по негативному влиянию газовой-жидких включений на безопасность удаления ВАО, как правило, не учитывали присутствия в каменной соли второго типа включений – межкристаллических, которые являлись основными каналами миграции внутрисолевых рассолов [24, 42].

Межкристаллические газовой-жидкие включения представляют взаимосвязанную объемно-пространственную систему капилляров и микрополостей неправильной формы, приуроченную к границам раздела кристаллов галита в каменной соли (рис.15, 16).

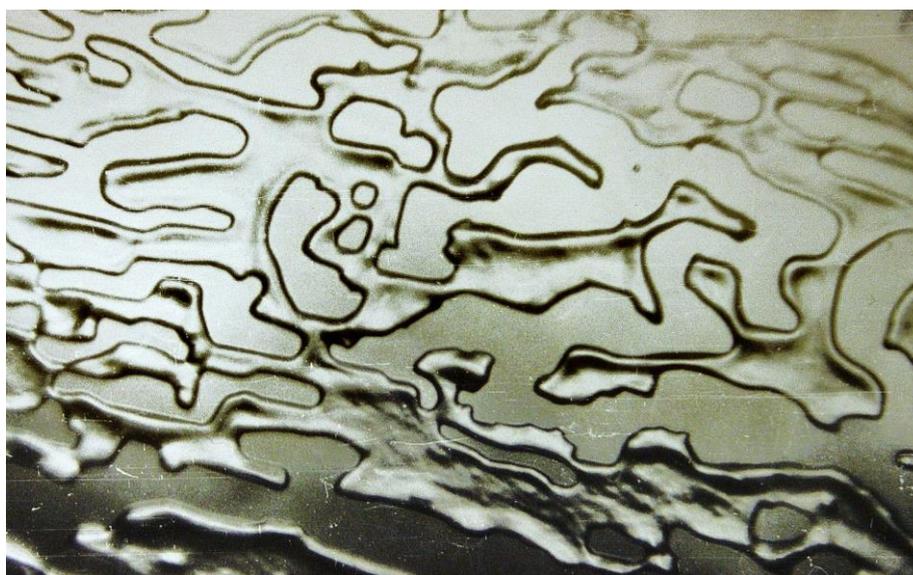


Рис. 15. Форма межкристаллических жидких включений. Сеитовская солянокупольная структура, Астраханская область. Ув.50.

Межкристаллические включения привлекли к себе внимание при поисках углеводородного сырья, как вероятные миграционные каналы нефтепродуктов [50]. По принятой терминологии они назывались «граничными» или «расшнурованными». Описываются в виде включений-вакуолей сложной формы с различными соотношениями жидкой и газовой фаз и слабой изоляции одной вакуоли от другой. Образуются либо на границах соседних кристаллов, либо по частично залеченным трещинам. Основной причиной образования такого вида включений являются, видимо, тектонические явления. Следует считать, что тектонические ослабленные зоны в солях должны представлять участки раскрытия граничных (межкристаллических) включений с последующим образованием соляных сыпучек (соляных россыпей) и потенциальных каналов миграции углеводородов [50].

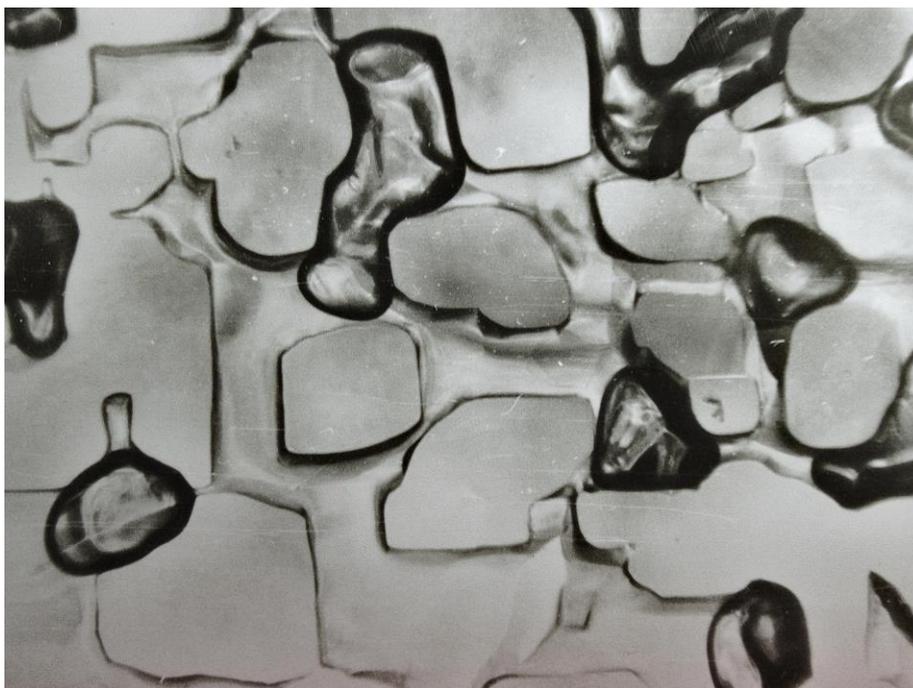


Рис. 16. Межкристаллические газово-жидкие включения. Карачаганакская солянокупольная структура, Казахстан. Ув.450.

В Радиевом институте в 70-80-х годах были проведены специальные исследования микроструктурных особенностей каменной соли солянокупольных структур: Большой Азгир, Сеитовская структура (восточная часть Прикаспийской низменности), солей из района Иркутского амфитеатра, Аванского месторождения (Армения) и др. [24, 42].

Установлено:

- количества включений различного вида может существенно различаться даже для отдельных участков одной солянокупольной структуры;
- замкнутые внутрикристаллические включения, двигаясь к источнику тепла, могут «разгружаться» в более крупные межкристаллические включения-вакуоли;
- при одностороннем нагреве пластинок каменной соли (15-20 мм) в лабораторных условиях до 200°C на её ненагреваемой поверхности происходит выход межкристаллических рассолов, продукты испарения которых накапливаются по границам кристаллов галита;
- препятствия на пути миграции растворов по межкристаллическим каналам являются прослой или включения глинистых, глинисто-карбонатных, сульфатных пород.

Практически мономинеральные галитовые породы состоят из неразъемных структурно-морфологических составных частей:

- твердых кристаллов каменной соли, которые могут содержать внутрикристаллические газово-жидкие включения;
- объемной системы вакуолей и капилляров межкристаллических включений, разделяющих кристаллы галита.

Именно эта объемная вакуольно-капиллярная система является основным путем миграции растворов в соляных породах. Трассы миграции имеют сложную форму с противотоками и застойными участками. Направление перемещения ми-

грантов может измениться в случае присутствия в породе прослоев или линз глинисто-карбонатных или сульфатных пород.

На микроуровне изменение направления миграции в вакуолях и капиллярах, образование застойных участков может происходить из-за присутствия газовых «затворов» – газовых включений, полностью перекрывающих миграционный канал небольшого сечения (рис. 16).

Функционально-морфологическими аналогами межкристаллических микровключений, но больших размеров, можно считать межблоковые макротрещины гранитоидных и других скальных пород.

Исследования, проведенные по международной программе Stripa [51], показали, что блоки горных пород по различным сторонам трещины в гранитах имеют многочисленные зоны и точки соприкосновения, что приводит к случайному распределению направлений и параметров движения трещинных вод. Наряду с главными каналами миграции существуют участки с застойными растворами, в которых миграция элементов происходит в основном путем диффузии (рис.17) [51].



Рис. 17. Общее представление движения водных потоков по макротрещинам в гранитоидных породах [51].

Зоны контактов отдельных блоков горных пород или соседних кристаллов нельзя рассматривать как геометрическое пространство, ограниченное двумя плоскостями. Направление и скорость миграции будут зависеть от морфологии миграционных каналов. При этом для микрообъектов, например межкристаллических включений в каменной соли, передвижение компонентов рассолов реализуется в основном в результате медленных диффузионных процессов.

Экранирующие свойства породы в целом будут определяться следующими параметрами [52]:

- пористостью,
- проницаемостью,
- эффективным сечением сквозных пор,
- коэффициентом фильтрации рассола,
- величиной диффузии радионуклидов по капиллярно-поровому пространству.

Растворимость галита в воде.

Галит (NaCl) хорошо растворим в воде (табл.3). При растворении происходит поглощение тепла.

Табл.3. Растворимость галита в воде, по [53]

Т, °С	К-во в растворе, масс. %	Удельный вес раствора
-15	24,64	1,206
-10	25,09	1,210
-5	25,49	1,215
0	26,21	1,222
5	26,27	1,223
9	26,33	1,223
14	26,40	1,224
25	26,54	1,226
40	26,81	1,229
50	27,00	1,231
60	27,14	1,233
70	27,47	1,236
80	27,65	1,238
90	27,99	1,241
100	28,37	1,245
109,7	28,75	1,249

Раствор с 26 % содержанием NaCl замерзает при $-18,43^{\circ}\text{C}$. Насыщенный раствор каменной соли кипит при температуре $109,7^{\circ}\text{C}$.

Необходимо обратить внимание, что плотность растворов NaCl выше плотности пресных вод, что и обуславливает образование природных гравитационно-устойчивых гидрогеологических систем [22].

Происхождение галита.

Основная масса залежей каменной соли образуется при экзогенных процессах испарения минерализованных вод мелководных лагун или заливов, замкнутых водоемов в условиях жаркого климата. Последовательность выпадения солей различного состава из растворов зависит от температурного режима, относительной концентрации солевых компонентов рассола и степени растворимости отдельных соединений солей.

Мировой океан содержит $4 \cdot 10^{15}$ тонн NaCl, т.е. из каждой тысячи тонн морской воды можно получить в среднем 1,3 тонны хлорида натрия.

Из морской воды, содержащей 3,5% растворенных солей, в присутствии анионов CO_3 и SO_4 в первую очередь выпадают труднорастворимые соли кальция – минералы кальцит CaCO_3 и гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. По мере увеличения концентрации раствора одновременно с гипсом, а затем и безводным сульфатом кальция ангидритом, появляется галит NaCl. В дальнейшем вместе с галитом и ангидритом в осадок последовательно выпадают сульфаты Na, K и Mg, хлориды K и Mg и, наконец, конечный продукт усыхания рапы хлорид магния – бишофит $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [37].

В соленосных формациях галит присутствует в виде сплошных, нередко практически мономинеральных масс каменной соли. В соляных куполах наблюдаются сложные слоистые складчатые структуры, размеры которых варьируют от крупных региональных складок в геологических формациях до микроскладчатых деформаций галитовых пород.

Галит вместе с другими продуктами возгонки отлагается на стенках и в трещинах вулканических кратеров. Необходимо отметить, что высокотемпературный вулканический галит содержит, как правило, сильвин (KCl), который входит в NaCl в виде твердого раствора.

1.5.2. Сильвин

Сильвин KCl. Образует кристаллы кубической формы, часто «оплывшие» из-за гигроскопичности хлористого калия. Кристаллическая структура такая же, как у галита: гранецентрированный куб. Величина элементарной ячейки существенно больше, чем у галита – $a = 6,293$ и $a = 5,628$ соответственно.

В виде изоморфной примеси почти постоянно присутствует KBr (до 0,1%) и в крайне малых количествах RbCl и CsCl [37]. Характерно, как и для галита, присутствие газовой-жидких микровключений.

Цвет молочный (мутный), реже бесцветный, белый и серый. Окраска красных и розовых сильвинов связана с присутствием мелкодисперсных чешуек гематита (Fe_2O_3) (рис. 18).



Рис.18. Прослой галита (светлый) в розовом сильвине. Соликамское месторождение. Музей им. А.Е. Ферсмана. Натуральная величина. Фото А.А.Евсеева. (<http://wiki.web.ru> время обращения 21.11.2012).

Твердость 1,5 - 2. Минерал хрупкий, легко крошится.

Плотность 1,97 – 1,99 г/см³. Температура плавления – 768°C.

Хорошо растворим в воде. В 100 г воды растворяется 34,7 г чистого сильвина при 20°C, а при 100°C – 56,6 г.[54].

Сильвин – основной минерал добываемых калийных солей, используемых преимущественно для удобрений. Крупнейшее в мире месторождение сильвина Соликамское (Россия), Стасфуртские месторождения в Германии, разработки сильвина в Эльзасе (Франция) и др.

В конце 40-х годов сильвин был использован сотрудниками Радиевого института Э.К. Герлингом и Н.Е. Титовым для определения константы K -захвата у ^{40}K , положив тем самым начало внедрения одного из самых продуктивных методов определения возраста геологических формаций – калий-аргонового [55]. Было доказано, что аргон, выделенный после растворения сильвина в дистиллированной

воде, состоит только из ^{40}Ar . Геологический возраст сильвина Соликамского месторождения был надежно установлен (кунгурский ярус верхней перми), что позволило геохимическим путем определить константу K -захвата, равную $(6,1 \pm 1,2) \cdot 10^{-11} \text{ год}^{-1}$. Позднее с появлением новых физических методов эта величина уточнялась.

Однако использование калий-аргонового метода для соляных формаций оказалось не всегда надежным, поскольку было установлено постоянное занижение абсолютного возраста. Дальнейшие исследования показали, что для каменной соли, особенно с крайне низкими содержаниями калийсодержащих минералов, изотопная геохронометрия может дать искаженные данные [56-59].

Под влиянием градиента температур в течение геологического времени аргон может мигрировать из своего первичного материнского минерала, переходить в замкнутые внутрикристаллические включения, а затем в систему межкристаллических капилляров и вакуолей. Из последних потери радиогенного аргона происходят при снятии литостатического давления и «декомпрессии» пород при разбуривании или проходке горных выработок. Уход аргона из межкристаллических пространств облегчается увеличением размеров пор при снятии всестороннего давления.

Миграция радиогенного аргона из сильвина происходит под влиянием пластического течения и стрессов, сопровождающих соляную тектонику и формирование купольно-штоковых структур. Миграцию газов и дегазацию растворов вызывают постоянно действующие планетарные факторы – вибрации и «встряхивания» литосферы под влиянием Солнца, Луны, морских приливов.

Возникшие затруднения при определении возраста соляных пород и таких минералов как сильвин, ввело понятие «возрастная метка» (табл. 4), которая может датировать различные этапы метаморфизма соляных формаций и наиболее интенсивные преобразования пород под влиянием тектонических процессов [58]. Следовательно, наиболее изменены и «омоложены» будут соляные породы солянокупольных структур. Такое заключение подтверждают данные таблицы 4, в которой первые три пробы представляют пластовые залежи, а все остальные – соляные купола.

По мнению авторов [58] окончательное решение вопроса датирования соляных пород калий-аргоновым методом требует дополнительных комплексных исследований соляной тектоники, а также сохранности газов в кристаллических структурах минералов и газовой-жидких включениях. Одновременно нельзя забывать о надежности аналитических методов, которые гарантируют «убедительные результаты, прежде чем пытаться делать далеко идущие выводы и определять возраст аргоновым методом» [60].

Таблица 4. Возрастные метки солей по К – Ar методу (по данным [58])

Место опробования	Глубина, м	Минерал	К, %	⁴⁰ Ar, см ³ /г·10 ⁻⁸	Возрастная метка, млн. лет	Геологический возраст метки*
Закарпатье, N ₁	–	Галит	0,003	0,2	20	N ₁
Соликамск, P ₁	–	Сильвин	33,4	30800	230	P – T
Забайкалье, Cm ₁	–	Галит	0,034	64,5	545	Cm ₂
Прикаспий (P ₁)						
Купол 1, скв. 1	1172	Галит	0,007	0	0	Q
« 2	1000	«	0,010	1,0	27	N ₁
« 3	1002	«	0,010	1,3	38	Pg ₃
« 4	600	«	0,140	63,2	125	Cr ₁
« 1, скв. 2	1190	«	0,0014	0,92	160	J ₁
Купол 1, скв. P-1	870	Галит	0,0126	8,1	165	J ₁
« «	900	«	0,0160	13,4	160	J ₁
« «	970	«	0,0180	7,2	105	Cr ₁
« «	1065	«	0,0130	5,1	100	Cr ₁
« «	1172	«	0,0067	0	0	Q
Индерский купол						
Штрек 4	–	Галит	0,026	22,0	220	J ₁
Орт 35	–	«	0,034	14,4	108	Cr ₁
Штрек 2	–	Сильвин	46,8	246,6	6,5	N ₂
Орт 23	–	«	51,2	99 100	455	O ₂

*- использована старая геохронологическая шкала, данные которой отличаются от современной общепринятой шкалы.

1.5.3. Ангидрит

Ангидрит – безводный сульфат кальция CaSO₄. Часто в виде примеси содержит стронций. Сингония ромбическая. В кристаллической решетке ионы S⁶⁺ располагаются в центрах тетраэдрических групп O²⁻, а каждый ион Ca²⁺ находится в восьмерном окружении кислородных атомов [37].

Кристаллы толстотаблитчатые или призматические. Обычно наблюдается в сплошных зернистых массах. В соляных толщах встречается как в виде отдельных кристаллов, так и в виде пластов и тонких пропластков, переслаивающихся с галитом, сильвином, карналлитом и др.

Твердость 3 – 3,5. Хрупкий. Плотность 2,9 – 3,0. Спайность совершенная по (010) и (001).

В присутствии воды при атмосферном давлении переходит в гипс (CaSO₄·2H₂O) со значительным (до 30%) увеличением объема. На глубинах более 100 – 150 м этот переход затруднен. Давление вышележащих пород препятствует увеличению объема горной массы, что делает невозможным переход ангидрита в гипс. Не исключено, что мощные ангидритовые толщи гипсоносных районов произошли путем обезвоживания под давлением вышележащих пород, первоначально отложившихся в солеродных бассейнах толщ гипса [37].

Растворимость ангидрита в воде низкая, в дистиллированной воде – 2036 мг/л при температуре 20°C [61]. Существенно повышается растворимость ан-

гидрита (и гипса) в растворе NaCl, достигая 8 г/л при концентрации каменной соли 100 г/л.

С увеличением концентрации хлорид-ионов растворимость сульфата кальция повышается [62] (рис. 19).

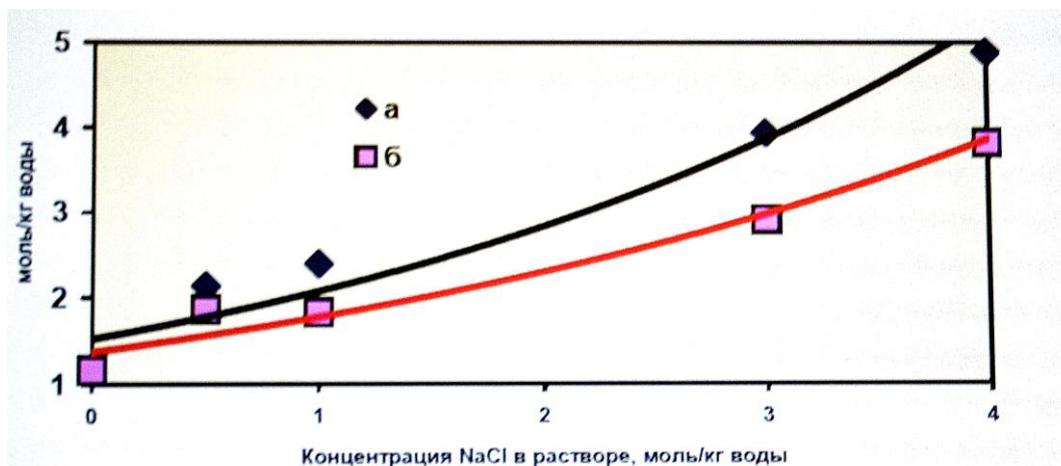


Рис.19. Влияние концентрации хлорида натрия в растворе на растворимость CaSO₄ (по [62]).

а – концентрация SO₄ · 10² моль/л воды;
б – концентрация Ca · 10² моль/л воды.

1.5.4. Гипс

Гипс – водный сульфат кальция CaSO₄ · 2H₂O.

Сингония моноклинная. Минерал имеет слоистую структуру, при которой два листа анионных групп [SO₄]²⁻, тесно связанные с ионами Ca²⁺, слагают двойные слои, ориентированные вдоль плоскости (010). Молекулы воды занимают места между этими двойными слоями. Такая структура объясняет совершенную спайность гипса по (010) и таблитчатый или призматический облик кристаллов [37].

Цвет белый, отдельные кристаллы бесцветные и водяно-прозрачные. Блеск стеклянный с перламутровым отливом на плоскостях спайности.

Твердость по шкале Мооса 1,5 – 2,0. Весьма хрупок, однако спайные пластинки сгибаются.

Плотность 2,31 – 2,33 г/см³.

Заметно растворяется в воде. При этом растворимость гипса достигает максимума при 37-38°C, а затем она быстро падает. Наибольшее снижение растворимости устанавливается при температурах более 107°C вследствие образования «полугидрата» – CaSO₄ · 1/2H₂O.

В дистиллированной воде при температуре 25°C растворимость гипса составляет 2800 мг/л [61]. В растворе NaCl (100 г/л) растворимость гипса выше и составляет 8 г/л.

В солеродных бассейнах гипс образуется на начальных стадиях испарения, когда концентрация других растворенных солей невелика. Затем после повышения концентраций NaCl, MgCl₂ вместо гипса осаждается ангидрит. Такая последовательность подтверждается расположением пластов гипса (а также ангидрита) в нижних частях соляных залежей, подстилаемых лишь химически осажденными известняками.

Значительные массы гипса образуются в результате гидратации ангидрита. Водный сульфат кальция возникает под влиянием воздействия поверхностных вод и в условиях невысокого внешнего давления (в среднем до глубины 100-150 м). Вследствие увеличения объема возникают местные сложные деформации пород, связанные как с нарушениями, так и залечиванием гипсово-ангидритовых толщ.

Гипс встречается как типичный гидротермальный минерал в сульфидных месторождениях. Уникальные кристаллы гипса (селенита) длиной до 11 и шириной до 4-х метров были обнаружены после осушения подземной пещеры на глубине 300 м на участке шахтного комплекса Найка в Мексике, штате Чиуауа (рис.20).



Рис. 20. Гигантские кристаллы селенита (волокнистого гипса) в Пещере Кристаллов (Cueva de los Cristales) шахты Найка в Мексике (mandalay.ru/naica.html время обращения 27.11.2012).

1.5.5. Карналлит

Карналлит – $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – выпадает одним из последних из остаточных рассолов и поэтому встречается в верхних частях геологического разреза соленосных формаций.

Сингония ромбическая, но кристаллическая форма выделения редка. Обычно встречается в зернистых массах.

Чистый минерал бесцветный, но обычно карналлит имеет розовую, красную, бурую или желтую окраску, обусловленную включениями окиси и гидроокиси железа.

Твердость по шкале Мооса 1,5 - 2. Минерал хрупкий. Спайность отсутствует. Плотность – 1,60.

В карналлите обычно присутствуют изолированные газопо-жидкие включения. При растворении минерала по мере ослабления прочности стенок вакуолей происходит взрыв находящихся под давлением газов [37].

Карналлит гигроскопичен и легко расплывается на воздухе, образуя густой рассол KCl (сильвин) и $MgCl_2 \cdot H_2O$ (бишофит).

Экспериментально установлено образование водорода при радиолизе кристаллизационной воды карналлита [63]. Радиолиз кристаллизационной воды связывается с присутствием природных радиоактивных изотопов ^{40}K и ^{87}Rb . Автор допускает, что повышенная трещиноватость карналлитовых пород по сравнению с каменной солью и сильвинитами является следствием водородного «газоразрыва».

Необходимо отметить, что образование водорода в карналлите затрагивает природу окраски галита. Принимая в качестве основной причины образования синего галита появление микрочастичек металлического натрия, в работе [64] ставится под сомнение механизм их образования за счет излучения ^{40}K . Первая причина энергетическая, поскольку энергия излучения генерируемого ^{40}K не может преобразовать (разрушить) молекулы $NaCl$. Вторая причина – в сильвинитовых породах ^{40}K значительно больше, чем в карналлите, но синей окраски галита в сильвинитах не наблюдается.

Можно допустить, что образующийся при радиолизе водород является сильнейшим восстановителем и способен восстанавливать $NaCl$ до металлического натрия. Скопление частичек Na в зонах роста галита на контакте с карналлитом и дислокациях внутри кристаллов обуславливают синюю окраску каменной соли [64].

2. Ударный метаморфизм

Термин ударный метаморфизм (*shock metamorphism*) включает в себя широкий спектр минералогических, химических и механических изменений в породах, подвергшихся внезапным динамическим нагрузкам при прохождении мощной ударной волны, возникшей при взрыве или сверхскоростном ударе [65]. Единственным известным природным процессом, при котором может проявиться ударный метаморфизм, является падение крупных метеоритов. Ударный метаморфизм характеризуется мгновенностью проявления, высокими пиковыми давлениями (от 10-100 кбар до мбар) и остаточной температурой (свыше $1500^{\circ}C$), кинетическими реакциями преобразования вещества. При ударном метаморфизме возникают высокобарические фазы ряда минеральных соединений (коэсит, стишовит, алмаз, рингвудит), происходит дробление минералов, разрушение их кристаллических решеток (появление диаплектовых минералов и стекол), плавление минералов и горных пород. Ударный метаморфизм является критерием метеоритного удара; он воспроизводится при подземных взрывах большой энергии и экспериментально в лабораторных условиях.

В результате сверхскоростного удара на поверхности, например, Земли, образуются кольцевые структуры – ударные кратеры, которые называют также астроблемами («звездными ранами») [66]. Горные породы, возникшие при ударе космических тел о Землю или измененные в результате удара и взрыва метеорита, называют импактитами.

В начале XX-го века ударные кратеры изучали отдельные энтузиасты, и актуальность проводимых исследований была сомнительной. Однако в дальнейшем работы в этом научном направлении получили существенную поддержку со стороны космических исследований (рис. 21) и оказались востребованными при проведении подземных ядерных взрывов.



Рис. 21. Кратер Дедал на Луне. Диаметр 93 км, глубина 3 км.
Ru.wikipedia.org/wiki/Дедал (кратер),
(время обращения 24.01.2013).

На планетах с плотной атмосферой ударные кратеры сохраняются в меньшей степени. На Земле их преобладающее количество, особенно древнего возраста, оказались стерты последующими геологическими событиями – тектоническими движениями, метаморфизмом, магматизмом, водной и ветровой эрозией и пр. Количество достоверно установленных ударных структур в настоящее время составляет более 200. В таблице 5 перечислены наиболее крупные астроблемы и время их образования [67]. На рис. 22 снимок кратера Вредефорт (ЮАР).

Таблица 5. Возраст некоторых крупных астроблем [67]

Название	Диаметр, км	Возраст, млн лет
Вредефорт (ЮАР)	335	2000 ± 50
Маникуган (Канада)	100	212 ± 2
Мороквенг (ЮАР)	340	145,5 ± 0,75
Попигай (Россия)	100	35,7 ± 2
Пучеж-Катунки (Россия)	80	175 ± 3
Садбери (Канада)	200	1850 ± 50
Чиксулуб (Мексика)	180	65,2 ± 4
Экремен (Австралия)	160	Около 590

Современная планетология рассматривает астероидные удары как одно из фундаментальных свойств окружающего нас пространства, активно влияющее на образование и развитие планет и планетных систем. Собираательные аккреционные процессы определили само формирование планет, но их интенсивность снижалась по мере расходования «строительного» материала. Предполагаемое разрушение планеты между Марсом и Юпитером с последующим образованием из обломков пояса астероидов продлило ударно-взрывное воздействие фрагментов этого пояса на поверхность планет [68].



Рис. 22. Кратер Вредефорт в Южной Африке. Диаметр 335 км.
 Объект всемирного наследия ЮНЕСКО, ru.wikipedia.org/wiki/Вредефорт (время обращения 11.11.2012).

Изучение кратера Нордлингер-Рис (Германия) позволило выделить несколько термально-барических зон, различающихся по степени изменения исходной породы, появлению характерных структур и минералов и по своему расположению относительно центра кратера (табл. 6) [69].

Таблица 6. Параметры термально-барических зон ударного кратера Нордлингер-Рис [69]. Диаметр кратера 23 км, глубина более 700 м.

Расстояние от центра, км	Давление, килобары	Максимальная температура, °С	Изменения пород, новые минералы
Внутри центральной части до 1,3 км	10 000 – 5 000	30 000 – 10 000	Испарение
1,3 – 1,5	1 000 – 600	5 000 – 1 500	Плавление
1,5 – 1,7	600 – 500	1500 – 900	Козсит
1,7 – 2,1	500 – 350	900 – 250	Козсит, стишовит
2,1 – 3,8	350 - 100	250 - 100	Стишовит

При столкновении с мишенью, горными породами на поверхности земли, скорость кратерообразующих метеоритов более 3-4 км/с. Начальное давление в момент удара около 10^9 Па при температуре 10 000 °С. Рассчитанное время воздействия ударной волны на горную породу – 10^{-6} секунды.

В районе удара происходят серьезные изменения горных пород на структурно-минералогическом уровне. Максимальные изменения – плавление и частичное испарение вещества – происходят в диапазоне давлений от $4 \cdot 10^9$ до $5 \cdot 10^{10}$ Па.

Индикатором наличия термально-барических изменений является появление модификаций кварца – коэсита, имеющего уплотненную структуру и плотность 2,91-2,93, а также тетрагонального стишовита с плотностью 4,28-4,35 г/см³.

Бесспорным свидетельством развития ударного метаморфизма является наличие специфических новообразованных пород [70]:

- зювитов – импактных брекчий с несортированными по размерам и неокатанными обломками с содержанием более 10-15 % стекол плавления;
- тагамитов – остывших ударных расплавов, импактных лав, образующих дайки, пластообразные тела, линзы и пр.

Метеоритный удар, разрушая и изменяя поверхностные породы, приводит впоследствии к созданию новообразований рельефа – кратерных структур. Ударный кратер состоит из днища, кольцевого вала и центрального поднятия. Днище – это структура отрицательной формы, из которой произошел вынос горных пород. Центральная горка, или центральный пик, образуется в кратерах диаметром от 5 до 50 км. В кратерах диаметром более 50 км образуется система центральных кольцевых поднятий. Кольцевой вал – насыпная структура, обрамляющая кратер. Обычно он асимметричен, поскольку внутренний склон круче внешнего. Объем кольцевого вала для ударных структур составляет 20-40 % от объема выброшенной породы.

Процессы ударного метаморфизма с образованием взрывного кратера разделяют на несколько стадий, начальной из которых является стадия ударного сжатия горных пород (рис. 23) [70]. Затем на прогрессивной стадии ударного метаморфизма за сравнительно короткий промежуток времени происходит образование и зональное распределение относительно воронки взрыва характерных минералов и пород. На поздних стадиях формируется взрывной кратер, происходит уплотнение выброшенных взрывом пород и грунта.

Пиковые давления, возникающие при подземных ядерных взрывах, достигают нескольких мегабар, т.е. такие же, как при метеоритных ударах с образованием ударных кратеров (рис.24). Изучение пород, подвергшихся воздействию ядерных взрывов, показало их аналогию с породами, испытавшими воздействие удара метеоритных тел. Среди новообразований подземных ядерных взрывов обнаружены стекломассы типа тагамитов и зювитов, высокобарическая модификация кварца коэсит и пр.

Сопоставление феноменологии и параметров астероидных и ядерно-взрывных кратеров принесло взаимно полезную информацию о природных и техногенных ударно-термальных процессах [69, 71, 72]. Возможность применения ядерно-взрывных технологий для решения проблемы защиты земли от опасных космических объектов в наше время продолжает развивать комплексные исследования по изучению ударного метаморфизма [73].

Изучение астроблем на поверхности Земли проводилось в основном в процессе прямых натурных исследований метеоритных кратеров, в которых главным научным направлением являлось геолого-минералогическое. При проведении подземных ядерных взрывов основным методом предварительных научных исследований являлось численное моделирование. Совершенствование численных методов сформировало отдельное научное направление моделирования ударных событий, последовательности развития отдельных фаз ударного метаморфизма [74].

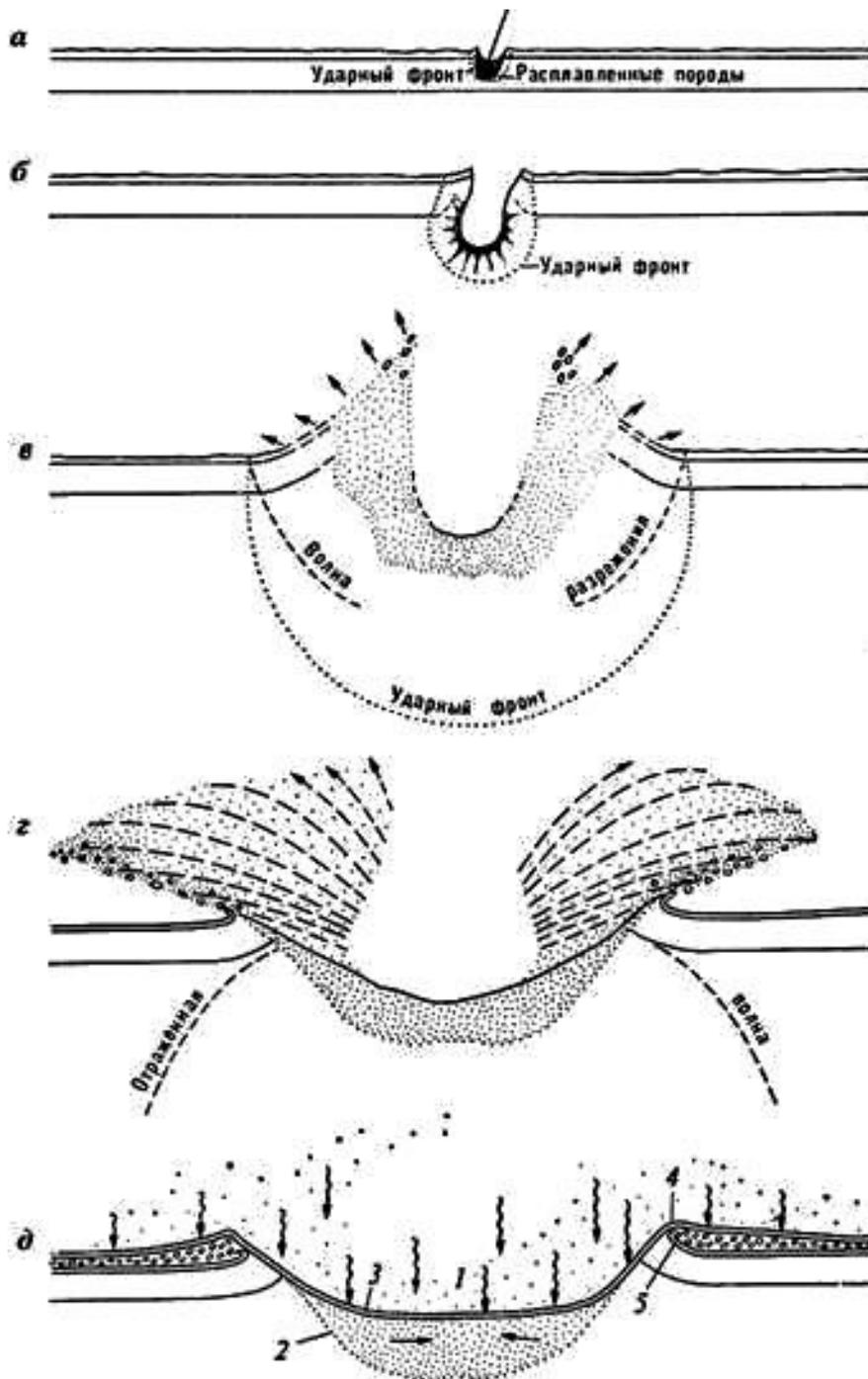
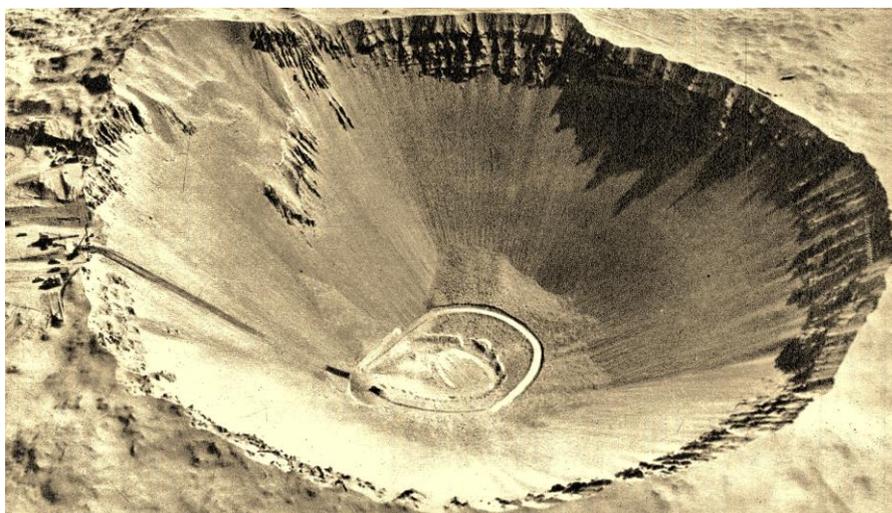


Рис. 23. Стадии образования взрывного кратера (по [70]).
a – в – I-я стадия – ударное сжатие, растекание метеорита в грунте;
г – II-я стадия – экскавация и выброс грунта отраженной волной;
д – III-я стадия – деформация или заполнение (*1* – воронка, *2* – истинное дно, *3* – видимое дно, *4* – вал брекчии, *5* – лежащая синклинали цокольного вала).



a



б

Рис. 24. *a* – кратер в штате Аризона (США), диаметром 1200 м и глубиной 180 м, образовавшийся после падения метеорита 50 000 лет назад (вес ~ 300 000 т, скорость 45-60 тысяч км/ч, [wikipedia.org/wiki/Аризонский кратер](http://wikipedia.org/wiki/Аризонский_кратер) (время обращения 05.12.2012));

б – кратер, диаметром 390 и и глубиной 98 м, образовавшийся 6 августа 1962 г. после ядерного взрыва Седан (Sedan), мощностью 104 кт. Глубина заложения – 193 м, вмещающие породы – аллювиальные отложения. en.wikipedia.org/wiki/Sedan (время обращения 05.12.2012).

В качестве примера следует привести результаты численного моделирования фаз образования и развития полости в каменной соли при проведении ядерного взрыва [75]. Каменная соль является единственной геологической средой, в которой возможно создание устойчивых подземных полостей ядерными взрывами. Последующее использование таких полостей-резервуаров определило актуальность этого направления ядерно-взрывных технологий.

При создании подземных емкостей в солях взрыв должен быть камуфлетным, т.е. взрывом полного внутреннего действия на сравнительно большой глубине, при проведении которого не образуется прямой гидрогазодинамической связи между центром заложения заряда и средой обитания человека, а также отсутствует напорный выход или истечение радиоактивных продуктов в атмосферу [76]. Камуфлетность обеспечивается соответствующей глубиной взрыва (линией наименьшего сопротивления) H , связанной с энерговыделением заряда в кт:

$$H = 90 - 120 \text{ м/кт}^{1/3}.$$

Развитие подземного взрыва в каменной соли представляет собой очередность нескольких последовательных фаз, характеризующих состояние среды и формирование полости [75]:

1. Фаза распространения тепловой волны, которая существует при мощных взрывах. На этой фазе происходит передача энергии от области ее мгновенного выделения в прилегающее пространство посредством лучистой теплопроводности. Распространение тепла в начале фазы не сопровождается гидродинамическими явлениями. Окружающее вещество почти неподвижно. Профиль температуры имеет ступенчатую форму: крутой температурный фронт, за которым температура по радиусу не меняется. При мощности взрыва 60 кт эта фаза длится $\sim 10^{-5}$ сек.

2. Фаза распространения ударной волны. Отрыв ударной волны от тепловой происходит в момент, когда скорость тепловой волны становится меньше скорости ударной волны, определяемой амплитудой давления. Для мощности взрыва 60 кт отрыв происходит в момент $3 \cdot 10^{-6}$ сек. Зона между тепловой и ударной волной имеет высокую температуру. К моменту $0,3 \cdot 10^{-3}$ сек за тепловым фронтом устанавливается однородная плотность, а в центре возникает зона заполнения веществом малой плотности и высокой температуры. Резкое возрастание плотности на периферии зоны очерчивает ее границу – контур полости, внутри которого плотность продолжает падать, а сама полость расширяться.

3. Фаза расширения полости, за границу которой принимается слой расплавленной каменной соли. Внутри полости находятся пары соляной породы, имеющие низкую плотность, которая по мере расширения полости продолжает понижаться. К внешней поверхности расплава примыкает двухфазная система «твердое тело – жидкость», а за ней находится твердая порода. Двухфазный слой очень тонок, и за его пределами располагается соляной массив. В первые 5-10 мсек, когда полость еще невелика, ее стенки покрыты слоем расплава, толщина которого по мере увеличения размеров полости уменьшается. Максимальные размеры полости, ее остаточный размер и устойчивость зависят от энергии взрыва и упруго-пластических свойств вмещающей породы, в первую очередь от предела упругости (текучести). Время максимального расширения полости составляет ~ 200 мсек.

4. Фаза обратного хода полости. Достигнув своих максимальных размеров, полость сокращается, начинается ее обратный ход. Происходит это в момент, когда приконтурная часть соляного массива, израсходовав полученную в ударной волне кинетическую энергию, останавливается. Давление в полости падает. Напряжение в массиве и давление в полости не находятся в состоянии взаимного равновесия. Происходит разгрузка радиального давления в массиве и движение границ полости внутрь, которое продолжается до достижения равновесия между полостным давлением и напряжением во вмещающем массиве. На этом завершается динамическая стадия развития полости, но под влиянием более медленных процессов теплопро-

водности продолжают внутриполостные перемещения вещества. Временной интервал обратного хода полости 0,2-1 сек.

5. Фаза относительной неподвижности и неизменности полости. Введение этой фазы носит условный характер, поскольку она прослеживается лишь в логарифмической шкале времени от 1 секунды до 10 секунд. Масштаб времени этой фазы сопоставим с временным масштабом, в котором проявляется действие силы тяжести

$$t = \sqrt{2h/g},$$

где h – характерный размер полости, g – ускорение силы тяжести.

Этого времени оказывается достаточно для того, чтобы солевой расплав успел стечь со стенок полости и начать накапливаться в ее донной части. В это же время происходит вывал отдельных кусков породы из трещиноватой зоны кровли полости, что приводит к искажению ее сферической формы.

6. Фаза интенсивного плавления стенок полости. В ударной волне испаряется и расплавляется некоторое количество каменной соли, но основное количество расплава накапливается в ходе процесса теплопередачи заполняющих полость паров соли к ее стенкам. За время $\sim 10^3 - 10^6$ секунды образуется основное количество расплава и его накопление в донной линзе. С увеличением глубины заложения полости ее объем уменьшается, но количество расплава остается тем же или несколько возрастает. Кроме того, увеличивается обратный ход полости, что на глубинах порядка 3000 м может привести к ее полному заплыванию, т.е. полость не образуется.

7. Фаза затвердевания расплава. Консолидация и затвердевание расплава происходит в процессе продолжающегося уноса тепла из зоны взрыва в интервале $10^6 - 10^8$ сек (от 12 сут до 3-х лет).

8. Заключительная фаза выравнивания температуры продолжается $10^8 - 10^{10}$ сек (от 3-х до 300 лет). В соляном массиве процесс остывания полости значительно ускоряется в случае проникновения в неё воды.

3. Первые ядерные взрывы в каменной соли, проведенные в США

Первые взрывы в каменной соли были проведены по программе «Плаушер», разработанной Комиссией по атомной энергии США в 1957 году [77]. Программа включала несколько научных проблем, которые предполагалось решить при техническом применении ядерных взрывов [78]:

1. Разработка полезных ископаемых (проведение вскрышных работ, дробление полезных ископаемых, добыча трудноизвлекаемой вязкой нефти при её разогреве энергией взрыва);

2. Строительство крупных сооружений (строительство насыпных плотин и дамб, каналов и гаваней, создание искусственных емкостей для хранения нефти и газа, регулирование гидрогеологического режима созданием искусственных водоносных структур);

3. Создание источников тепловой энергии за счет разогрева горных пород подземными ядерными взрывами большой мощности;

4. Производство трансплутониевых элементов и ценных минеральных компонентов (получение алмазов из графита или других углеродсодержащих материалов);

5. Сейсмические исследования крупных геологических структур и изучение вопросов сейсмологии (искусственные землетрясения).

По программе «Плаушер» проведено 27 взрывов, и только четыре из них проводились за пределами Невадского полигона, в том числе взрыв «Гном» в штате Нью-Мексико и взрыв «Сэлмон» в штате Миссисипи.

Для проведения первого ядерного взрыва в каменной соли «Гном» была выбрана пластовая формация Саладо на участке, расположенном в 40 км к юго-востоку от г. Карлсбад в штате Нью-Мексико [79]. Формация Саладо входит в крупный Делавэрский соляной бассейн нижнепермского возраста.

Стратиграфический разрез на участке взрыва (рис. 25):

0 – 13 м – песчано-известковые отложения;

13 – 28 м – пески и песчаники;

28 – 90 м – красноцветные алевриты, песчаники и сланцы (Devey Lake Redbeds);

90 – 198 м – ангидриты и гипсы с водоносным пластом доломитов (Rustler Formations);

198 – 216 м – ангидриты и алевриты;

216 – 457 м – каменная соль формации Соладо с прослойками глинистых сланцев, ангидрита и полигалита.

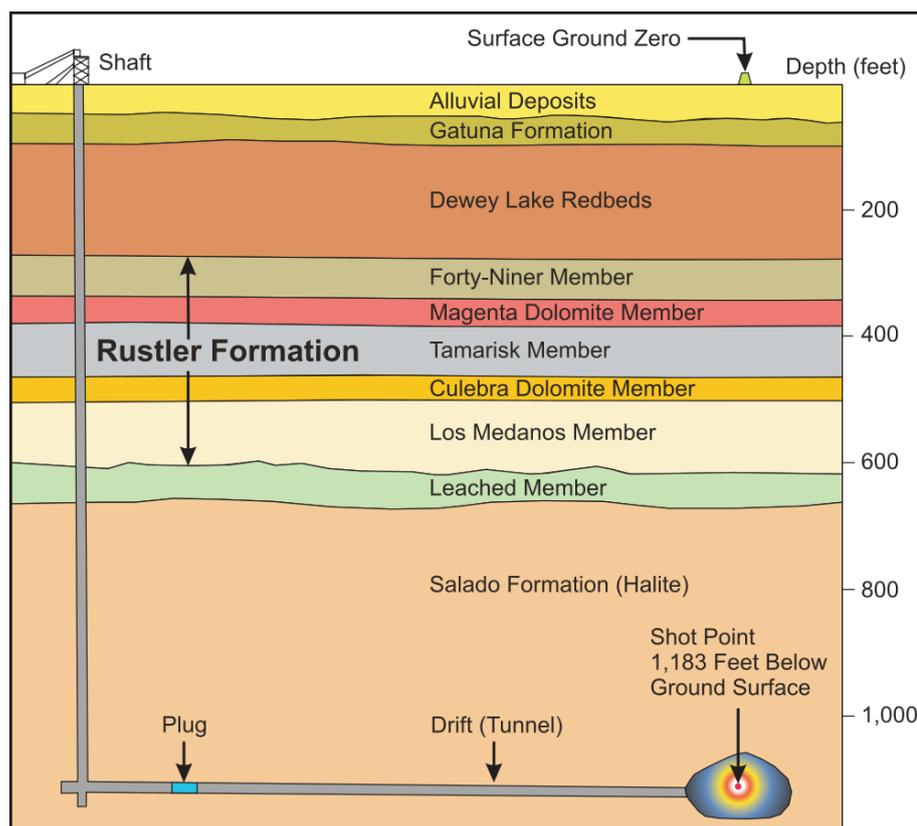


Рис. 25. Геологический разрез участка проведения подземного ядерного взрыва «Гном», http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gnome-Coach_Site.svg (время обращения 12.12.2012).

Свойства каменной соли: плотность – 2,16 г/см³, пористость – 2,7 %, влажность – ~ 1%.

Для заложения ядерного устройства пройдена вертикальная шахта диаметром 3 м и глубиной 370 м. От шахтного ствола на отметке 365 м пройдена горизонтальная выработка сечением 2,45 x 3,1 м длиной 340 м. Ее концевой участок выполнен в виде крюка для самоизоляции полости после взрыва. Прямой участок «крюка», примыкающий к зарядной камере, после заложения заряда был заполнен мешками с солью. По всей длине горизонтальной выработки были сооружены железобетонные перемышки с противоударными дверьми.

Проведение взрыва «Гном» ставило перед собой следующие задачи:

- определить возможность преобразования энергии, высвобождаемой в результате ядерного взрыва, в скрытую теплоту с последующим отбором водяного пара для производства электроэнергии;
- изучить возможность выделения (extraction) образующихся в результате взрыва целевых радиоактивных изотопов;
- выполнить измерения нейтронных сечений для развития программы разработки ядерных реакторов;
- установить различия проведения ядерного взрыва в каменной соли от взрывов в туфах;
- получить данные для конструирования ядерных зарядов, используемых для взрывов в промышленных и научных целях.

Для экспресс-отбора проб в зарядную камеру с поверхности пробурена скважина, в которой установлен вакуумированный трубопровод. Нижний конец трубопровода закрыт алюминиевым диском, испаряющимся при взрыве.

Предполагалось изучить:

- изотопы, имеющие промышленное значение, например ^{244}Cm и ^{210}Po для электрогенераторов;
- расщепляющиеся изотопы, например плутоний;
- трансплутониевые изотопы (известные и неизвестные).

Для образования изотопов в зарядную камеру были помещены различные материалы, содержащие серебро, золото и ^{235}U .

Взрыв мощностью $3,1 \pm 0,5$ кт был произведен 12 октября 1961 г. на глубине 367 м. На момент взрыва наблюдалось поднятие грунта в его эпицентре на высоту ~ 1,3 м, а также выброс парогазовой смеси из ствола шахты. Активность парогазовой смеси, выходящей из шахтного ствола вначале была очень высокой, но затем быстро снижалась. Через 10 дней после взрыва она составляла 100 мр/ч, через 15-20 дней – 5 мр/ч, через 1,5-2 месяца – 1-2 мр/ч [79]. В тексте ссылки [79] и других ранних публикациях использована принятая в то время единица экспозиционной дозы рентгеновского или гамма-излучения – рентген (Р) и его кратные единицы (1 Р/ч ~ 0,01 Зв/ч).

Отсутствие радиоактивного загрязнения промплощадки позволило через два дня после взрыва начать бурение двух скважин из района эпицентра к полости взрыва.

Спустя шесть дней после взрыва проведено обследование шахтного ствола и горизонтальной выработки к центральной зоне взрыва. Замеры, проведенные по скважинам через месяц после взрыва показали, что в свободном пространстве образовавшейся полости мощность дозы составляет 0,2-0,4 Р/ч и 5-20 Р/ч – в зоне пород навала, упавших в радиоактивный соляной расплав. Температура в свободной части полости была выше 100°C, в зоне обрушения варьировала от 50 до 650°C.

Вследствие экранирующего действия обломков навала, покрывающих застывший расплав, мощность дозы на поверхности навала через шесть месяцев после взрыва составила 50-60 мР/ч, через год – не более 5 мР/ч. Поэтому уже через полгода по вновь пройденной горизонтальной выработке (штреку) в полость вошли исследователи, а в первую годовщину взрыва «Гном» (декабрь 1962 г.) полость посетили и сфотографировали представители прессы (рис.26).



Рис. 26. Полость подземного ядерного взрыва в каменной соли «Гном» [15].

Обследование показало, что первоначальная полость взрыва диаметром 30-33 м частично заполнена обрушившейся с ее стенок и кровли породой. Максимальный диаметр в горизонтальной плоскости в средней части составил 52 м, диаметр нижней полусферы – 34 м, верхней полусферы – 45 м, максимальная высота свободного пространства – 27 м. Зона разрушения примыкающих к стенкам полости пород ограничена 2-4 м. Трещины в соляном массиве распространились главным образом со стороны кровли полости на расстояние до 60 м. На конфигурацию свободного пространства повлияла слоистая структура соляного пласта.

Количество расплава по сделанным оценкам составило 2 400 т (~ 770 т/кт). Общее количество обрушившейся породы (навала) составило 28 000 т. Основная часть радиоактивных продуктов, находящихся в твердом состоянии, была захвачена расплавом и сконцентрировалась в смеси этого расплава с материалом навала, располагающейся в нижней, донной части полости.

Эксперименты по нейтронной физике прошли успешно. Установленные до взрыва в горизонтальной выработке специальные нейтронные маховики были извлечены через шесть суток после взрыва. Нейтронный поток у маховиков составлял 10^{12} нейтрон/(сек. см²).

Эксперименты по использованию пара были прекращены, поскольку пар не обладал нужными свойствами.

Отбор керновых проб показал, что 99% твердых радиоактивных изотопов задержаны в расплаве соли. Этот материал легко растворялся в воде, после чего из раствора отдельные изотопы (плутоний, америций, кюрий и пр.) выделялись общепринятыми химическими методами.

Водоносный горизонт доломитовых пород, расположенный в 195 м выше точки заложения заряда, был мало нарушен. Просачивание воды из него в ствол шахты осталось таким же, как и до взрыва, – 3,4 л/ч.

После взрыва «Гном» район его проведения тщательно обследовался для определения и изучения распределения техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды [80]. Дополнительный интерес к радиационному мониторингу привлек проект строительства в соляном пласте формации Саладо вблизи площадки проведения взрыва «Гном» подземного хранилища радиоактивных отходов – WIPP [81]. Результаты исследований участка проведения взрыва «Гном» были использованы при оценках пластовой залежи каменной соли для строительства WIPP [15, 80].

Для проведения второго экспериментального взрыва в каменной соли «Сэлмон» (“Salmon”) был выбран соляной купол Татум (Tatum) в южной части штата Миссисипи в 37 км юго-западнее г. Хаттисбурга [82]. Плоская поверхность купола находится на глубине 448 м и перекрыта 179-метровой толщей кепрока. Непосредственно на солях залегает пласт ангидритовых пород (138 м), выше которых расположен слой известняков с линзами песчаников. Кепрок перекрыт осадочными породами олигоцена и миоцена, представленными в основном чередующимися слоями глинистых сланцев и обводненных песчаников, общей мощностью 269 м (рис. 27).

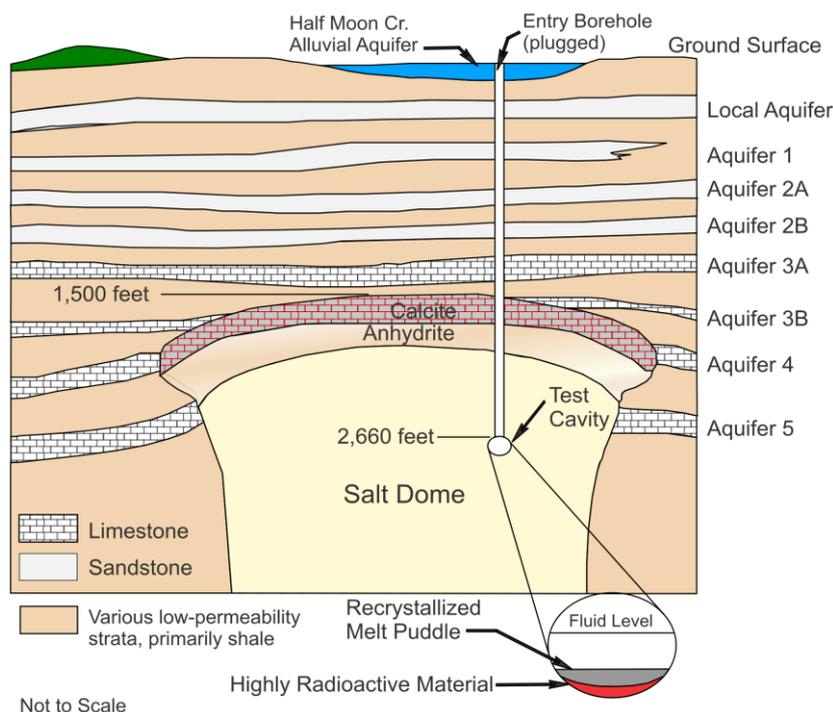


Рис. 27. Геологический разрез участка проведения взрыва «Сэлмон» в соляном куполе Татум. Купол перекрыт ангидритовыми (Anhydrit) и кальцитовыми (Calcite) породами кепрока. Выше залегают чередующиеся прослойки водоупорных глинистых сланцев и водоносных песчаников (Aquifer 1...5).

http://en.wikipedia.org/wiki/Salmon_Site (время обращения 17.12.2012).

Породы купола представлены серым крупнозернистым галитом с прослоями ангидрита (~ 10 %). Ориентировка слоистости солянокупольной структуры близка к вертикальной. Диаметр соляного диапира ~ 1 500 м, глубина залегания материнского пласта – более 6 000 м. Возраст солей принимается пермским, но существуют данные о его юрском времени образования (или наиболее активной фазы диапиризма) [83].

Плотность каменной соли варьирует от 2,13 до 2,215 г/см³, составляя в среднем на участке взрыва 2,18 г/см³. Пористость изменяется в пределах 1,53-8,59 %, составляя в среднем – 3,61 %.

Ядерный взрыв мощностью 5,3 ± 0,5 кт проведен в скважине на глубине 827,8 м 11 октября 1964 г. Исследования образовавшейся после взрыва полости и окружающих ее пород проводились в процессе разбуривания нескольких скважин [82]. Взрывом «Сэлмон» создана полость сферической формы с радиусом 17,4 ± 0,6 м. Закристаллизованный соляной расплав (~ 2 700 м³) находится в ее донной части (Recrystallized Melt Puddle на рис. 27). Зона развития микротрещин распространилась на расстояние до 50 м от стенок полости, крупные трещины – на расстояние до 30 м. При этом трещины, связанные с нижней частью полости, заполнены застывшим соляным расплавом. В трещинах кровли полости расплав отсутствует.

В переплавленной соли присутствуют газовые включения со средним диаметром 0,75 см, за счет чего плотность ее снижается до 1,9 г/см³ (плотность исходной каменной соли – 2,18 г/см³). Радиохимический анализ полостных газов показал, что каменная соль находилась в расплавленном состоянии, по крайней мере, в течение месяцев. Такое заключение было сделано по данным определений количества ¹³¹Xe, вышедшего полностью в газовую фазу полости из расплава, в котором находился его предшественник – ¹³¹I с периодом полураспада 8,04 дня.

Образовавшиеся из расплава кристаллы галита имеют размеры 2-3 см, которые уменьшаются по направлению к центральной части донной линзы – направлению кристаллизации расплава. На отдельных участках встречаются округлые кристаллы галита (~ 1 мм), окруженные эвтектическими прорастаниями кристаллов галита и ангидрита (рис. 28). Ангидрит-галитовая эвтектика содержит 37,2 % ангидрита и кристаллизуется при температуре 721°C.

В нижней части донной линзы находится темный прослой с аномально высокой радиоактивностью – до 100 Р/ч при контактных измерениях через 4 месяца после взрыва. Толщина прослоя вблизи осевой части полости 0,75 м (см. рис. 27 “Highly Radioactive Material”). В извлеченном из этого прослоя материале обнаружены компоненты осадка, окружающего взрывное устройство, тугоплавкие продукты деления и железо оболочки заряда. Идентифицированы новообразованные минералы [82, 84]: ларнит (Ca₂SiO₄); геленит (Ca₂Al₂SiO₂) и магнетит (Fe₃O₄).

Силикатные минералы имеют форму сфер диаметром 0,1-0,5 мм, что свидетельствует об их конденсации и выделении в то время, когда каменная соль находилась в газовой фазе, при температурах около 2600°C. Обнаружены также вторичные минералы, образовавшиеся в процессе разбуривания полости: натроярзит (NaFe₃SiO₄(OH)₆) и кальцит (CaCO₃).

При максимальном радиусе полости 22 м зона дробления развивается на расстоянии до 40 м, а отдельных трещин – до 150 м. Ангидрит в зоне дробления приобретает «фрагментарную», мозаичную структуру. На расстояниях от 7- 47 м от стенок полости галит приобретает молочно-белую окраску, связанную с появлени-

ем большого числа микротрещин. Наиболее интенсивное дробление каменной соли наблюдается ниже полости взрыва.

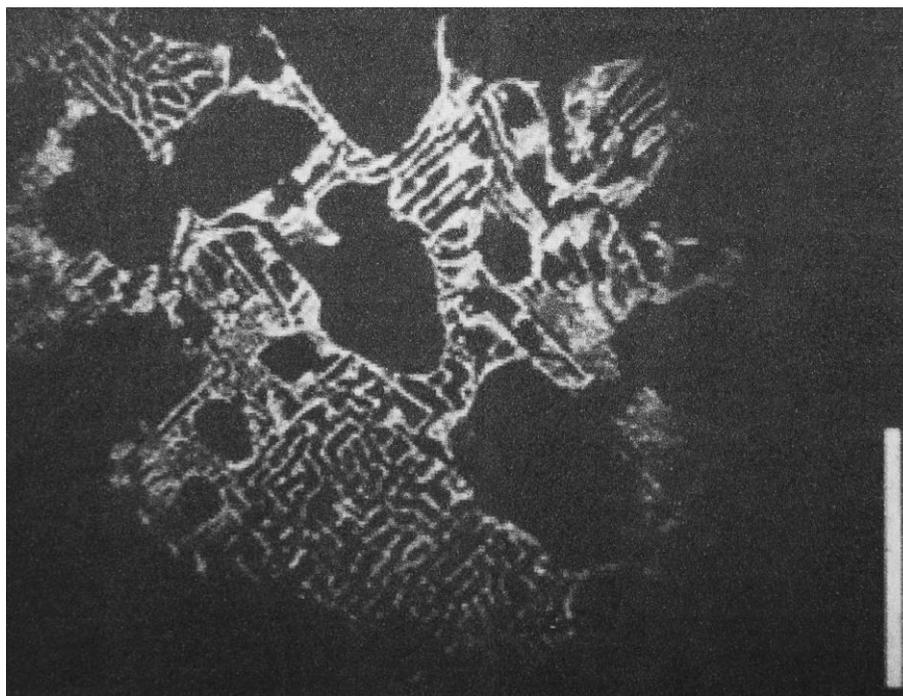


Рис. 28. Микроструктура перекристаллизованной соли из донной линзы полости взрыва «Сэлмон», образованная чередованием галита (темный) и ангидрита (светлый) при их кристаллизации из эвтектического расплава. Маркер равен 1 мм [82].

Исследования, проведенные после взрыва показали, что влияние эксперимента «Сэлмон» ограничено солевой средой купола Татум без следов проникновения радиоактивных продуктов в водоносные пласты [83].

В полости взрыва «Сэлмон» 3 декабря 1966 года проведен повторный ядерный взрыв «Стерлинг» (“Sterling”) мощностью 0,38 кт.

4. Государственная программа СССР «Ядерные взрывы для народного хозяйства»

В начале 60-х годов в Советском Союзе была разработана Государственная программа № 7 «Ядерные взрывы для народного хозяйства». Научным руководителем Программы стал доктор технических наук О.Л. Кедровский – директор Всесоюзного проектно-изыскательского и научно-исследовательского института промышленной технологии (ВНИПИпромтехнологии). Программа выполнялась в течение 1965-1988 гг. и включала широкий спектр направлений технического и научного использования взрывов (строительство, геотехнология, энергетика, производство материалов, научные исследования) [73, 85, 87]. Количество ядерных устройств, взорванных в мирных целях в СССР, значительно превышало аналогичную величину в рамках мирной программы США, при большем общем числе американских ядерных испытаний 1945 – 1992 гг. (табл. 7).

Таблица 7. Количество ядерных испытаний СССР и США [88].

Характеристика	СССР	США
Общее число ядерных испытаний	715	1056
Общее число ядерных устройств, взорванных в мирных целях	135	35

В качестве основных направлений, по которым был выполнен большой объем инженерно-технических и научно-исследовательских работ, и реализованы поставленные Программой задачи, можно выделить:

1) Сейсмическое зондирование земной коры на всей территории страны, которое проводилось по совместному заказу Министерства геологии и Академии наук СССР. Основная цель – поиски геологических структур, перспективных для разведки полезных ископаемых. По сравнению со взрывами химических взрывчатых веществ использование ядерных взрывов увеличивало глубину зондирования до 50 км, улучшало качество получаемых геофизических профилей, а также значительно сокращало сроки и стоимость проводимых работ.

Проведение сейсмического зондирования требовало:

- проведения взрыва в строго определенное время, поскольку запуск регистрирующих станций осуществлялся автономно по радиосигналу, а время работы сейсмостанций весьма ограничено;
- соблюдения заданной мощности взрыва, что необходимо для интерпретации полученных результатов;
- соблюдения радиационной безопасности.

Радиационная безопасность обеспечивалась существующими критериями выбора геологических и гидрогеологических условий на участке взрыва, глубиной заложения заряда и его мощности, оптимальной конструкцией скважин с тщательным проведением изоляционных работ в процессе их разбуривания. Негативные последствия сейсмических эффектов практически отсутствовали, поскольку взрывы производились в малонаселенных районах.

Проведено 39 ядерных взрывов мощностью от 2,3 до 22 кт на глубинах от 395 до 1002 м (табл.8). После проведения взрывов построено 14 геологических профилей общей протяженностью около 70 тыс. км.

В рамках комплексной программы Мингео СССР и АН СССР по изучению геологического строения земной коры, использование подземных ядерных взрывов для глубинного сейсмического зондирования подтвердило наличие 10-ти газовых и газоконденсатных месторождений на 15-ти разведочных площадях в Енисейско-Хатангской впадине и 10-ти месторождений на разбуриваемых площадях Вилюйской синеклизы. В Якутии было обнаружено Мархинское алмазное поле.

Таблица 8. Подземные ядерные взрывы, произведенные для зондирования земной коры на территории СССР [73, 87]

№№ пп	Дата проведе- ния взрыва	Район проведения и условное название взрыва	Мощность, кт ТЭ	Глубина заложения заряда, м
1	04.10. 1971 г.	Архангельская область «Глобус» (ГБ-2)	2,3	595
2	19.07. 1985 г.	«Агат»	8,5	772
3	06.09. 1988 г.	«Рубин» (РН-1)	8,5	820
4	19.09. 1971 г.	Ивановская область «Глобус» (ГБ-1)	2,3	610
5	10.09. 1977 г.	Иркутская область «Метеорит» (М-4)	7,6	550
6	31.07. 1982 г.	«Рифт» (РФ-3)	8,5	554
7	03.10 1971 г.	Республика Калмыкия «Регион» (Р-4)	6,6	485
8	18.09. 1984 г.	Кемеровская область «Кварц» (К-4)	10	557
9	02.07. 1971 г.	Республика Коми «Глобус» (ГБ-4)	2,3	542
10	10.07. 1971 г.	«Глобус» (ГБ-3)	2,3	465
11	29.08. 1974 г.	«Горизонт» (Г-1)	7,6	583
12	11.08. 1984 г.	«Кварц» (К-2)	8,5	759
13	29.09. 1975 г.	Красноярский край «Горизонт» (Г-3)	7,6	834
14	26.07. 1977 г.	«Метеорит» (М-2)	15	850
15	21.08. 1977 г.	«Метеорит» (М-3)	8,5	600
16	21.09. 1978 г.	«Кратон» (КР-2)	15	886
17	06.09. 1979 г.	«Кимберлит» (КМ-3)	8,5	599
18	01.11. 1980 г.	«Батолит» (БТ-1)	8	720
19	22.10. 1981 г.	«Шпат» (ШП-2)	8,5	581
20	04.09. 1982 г.	«Рифт» (РФ-1)	16	960
21	25.09. 1982 г.	«Рифт» (РФ-4)	8,5	554
22	21.09. 1972 г.	Оренбургская область «Регион» (Р-1)	2,3	485
23	24.11. 1972 г.	«Регион» (Р-2)	2,3	675
24	14.08. 1974 г.	Тюменская область «Горизонт» (Г-2)	7,6	534
25	17.10. 1978 г.	«Кратон» (КР-1)	22	593
26	04.10. 1979 г.	«Кимберлит» (КМ-1)	22	837
27	25.08. 1984 г.	«Кварц» (К-3)	8,5	726
28	22.08. 1988 г.	«Рубин» (РН-2)	15	829
29	11.08. 1977 г.	Читинская область «Метеорит» (М-5)	8,5	494
30	12.08. 1975 г.	Республика Саха (Якутия) «Горизонт» (Г-4)	7,6	496
31	09.08. 1978 г.	«Кратон» (КР-4)	22	567
32	24.08. 1978 г.	«Кратон» (КР-3)	22	577
33	12.08. 1979 г.	«Кимберлит» (КМ-4)	8,5	982
34	20.08.1972 г.	Казахстан «Регион» (Р-3)	6,6	489
35	24.11.1972 г.	«Регион» (Р-5)	6,6	423
36	15.08.1973 г.	«Меридиан» (МН-3)	6,3	600
37	28.08. 1973 г.	«Меридиан» (МН-1)	6,3	395
38	19.09. 1973 г.	«Меридиан» (МН-2)	6,3	400
39	03.10. 1987 г.	«Батолит» (БТ-2)	8,5	1002

2) Создание опытно-промышленных подземных емкостей для хранения углеводородного сырья, в первую очередь газоконденсата.

Заказчиком являлось Министерство газовой промышленности СССР. Создание ядерными взрывами крупных полостей-хранилищ в каменной соли снимало проблему коррозии металлических емкостей сероводородом, как правило, присутствующим в газоконденсате. В перспективе оказалось возможным включать подземные емкости в технологический комплекс предприятий по переработке углеводородного сырья. Проведено 25 взрывов в соляных породах вблизи Оренбургского, Астраханского и Карачаганакского месторождений. Условия и результаты проведения этих взрывов будут рассмотрены подробнее в дальнейшем.

Подземные хранилища широко используются для покрытия пиковых нагрузок в системе газоснабжения, поскольку могут эксплуатироваться в «равновесном» режиме с производительностью отбора, на порядок превышающей производительность отбора из подземных хранилищ в пористых породах. Наличие парка хранилищ в каменной соли имеет большое значение в условиях рыночной экономики, так как легковосполняемые запасы компенсируют краткосрочные колебания газопотребления, предотвращают финансовые потери за дисбаланс в поставках газа из-за аварий на газопроводах, создают возможность планирования закупки газа на региональном уровне с учетом колебаний цен.

В настоящее время в мире методом размыва создано около 70 подземных газохранилищ в каменной соли с общей емкостью около 30 млрд. м³. Наибольшее количество соляных емкостей эксплуатируются в США, где их количество 31, а общий объем – около 8 млрд. м³. В Германии эксплуатируются 19 хранилищ с суммарным объемом около 7 млрд. м³.

На территории России подземных хранилищ газа в каменной соли сооружаются методом размыва в Калининградской, Волгоградской и Тульской областях .

3) Интенсификация добычи на нефтяных промыслах.

Работы выполнялись по заказу Министерства нефтяной промышленности СССР. Основным разработчиком технологий повышения коэффициента извлечения нефти на эксплуатируемых месторождениях являлся Московский институт нефти и газа им. И.М.Губкина.

В 1965 году впервые в мировой практике были осуществлены опытно-промышленные работы с применением ядерно-взрывной технологии в условиях действующего промысла на Грачевском месторождении в Башкирии (объект «Бутан»). В теле истощенной нефтяной залежи на глубинах 1341 – 1375 метров проведено три взрыва небольшой мощности (от 2,3 до 8,0 кт).

Результатами опытных работ явились:

- успешное испытание созданных специальных ядерных изделий, отработка технологии их спуска и подъема в глубоких стандартных скважинах;
- определение критериев и доказательств возможности безопасного проведения подземных ядерных взрывов в условиях действующего нефтяного промысла;
- увеличение дебита стимулированных взрывом скважин в 1,5 – 2 раза и создание условий для формирования над месторождением газовой «шапки», сохраняющей давление в нефтяной залежи и увеличивающей коэффициент нефтеотдачи на 5-8%.

С 1968 по 1987 гг. применение ядерно-взрывных технологий для интенсификации добычи нефти были расширены для различных условий месторождений нефти и газа:

- на Осинском месторождении (Пермская область), представляющем типичную нефтяную залежь пластового типа с водонапорным режимом (объект «Грифон»);
- на Тяжском месторождении (Пермская область), аналогичном по геологическим условиям с Грачевским месторождением (объект «Гелий»);
- на Еси-Егоровском месторождении (Западная Сибирь), находящемся на стадии разведки (объект «Ангара»);
- на Средне-Балыкском месторождении (Западная Сибирь), находящемся на стадии разведки (объект «Бензол»).

Радиационная обстановка на месторождениях, где проводились взрывы, оставалась в рамках нормы за исключением Осинского, на котором произошло загрязнение подземных вод до уровня допустимого санитарными нормами [73].

Для освоения забалансовых запасов нефти и газа крупномасштабный опытно-промышленный эксперимент проведен на Средне-Ботуобинском месторождении (республика Саха, Якутия). На площади 400 км² проведены восемь камуфлетных ядерных взрывов на глубине 1502 – 1545 м (проект «Нева»). Ядерные заряды размещались в подошвенной части пласта-коллектора. Последующие наблюдения показали, что после взрывов продуктивность скважин в ближайшей зоне воздействия (150-800 м) увеличилось в 1,5 раза, а «сухие» скважины дали промышленный приток нефти и газа. Максимальный размер ореола распространения таких радионуклидов как ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs по пласту не превысит 300 м за 10 периодов их распада (~ 300 лет).

4) Тушение и ликвидация неуправляемых газовых фонтанов.

Для перекрытия ствола аварийной скважины ядерный заряд размещается вблизи ее в разбуриваемой наклонной скважине. После взрыва происходит смещение пород, достаточное для полного перекрытия аварийного ствола. Ядерными взрывами в 1966-1972 гг. было потушено четыре аварийных фонтана на газовых месторождениях (табл. 9).

Таблица 9. Опытно-промышленные работы по перекрытию аварийных скважин газовых фонтанов, проведенные в СССР [87]

Условное наименование	Месторождение	Мощность взрыва, кт	Глубина, м	Дата проведения
«Урта-Булак»	Узбекистан, Бухарская область, 80 км южнее г. Бухара	30	1532	30.09.1966
«Памук»	Узбекистан, Кашкадарьинская область, 70 км западнее г. Карши	47	2440	21.05.1968
«Кратер»	Туркмения, Марыйская область, 30 км юго-восточнее г. Мары	15	1720	11.04.1972
«Факел»	Украина, Харьковская область, 20 км севернее г. Краснограда	3,8	2483	09.07.1972

Наиболее мощным был факел на газовом месторождении «Урта-Булак». В декабре 1963 г. при бурении эксплуатационной скважины на глубине 2450 м произошел аварийный выброс газа давлением около 300 атмосфер. Высота горящего факела достигала 75 м. Дебит горящего газового фонтана составил более 12 млн. м³ в день. Этого количества газа было бы достаточно для снабжения такого крупного города, как Ленинград [73]. Горящий фонтан пытались ликвидировать всеми известными в практике нефтяной и газовой промышленности способами в течение пяти лет. Использование ядерного взрыва явилось, по существу, последней технологией, которая может ликвидировать аварию.

Вскрытый аварийной скважиной геологический разрез был представлен толщей каменной соли на глубине 1900-2450 м, перекрывающей продуктивный газовый пласт. Выше солей залежали терригенные отложения.

Для ликвидации аварии были пробурены две наклонные скважины, забой одной из которых располагался в 35±10 м от аварийного ствола. Высокая температура в месте расположения ядерного заряда (более 70°С) потребовала его охлаждения путем создания специального стального корпуса, по которому циркулировал охлаждающий раствор. Вместе с охлаждающим корпусом заряд имел длину около 3 м, диаметр 40 см и массу 900 кг [87]. Используемая мощность взрыва гарантировала смещение колонны и ствола аварийной скважины, ликвидировав тем самым питание горящего газового фонтана.

Подрыв заряда был осуществлен 30 сентября 1966 года. Выход газа из ствола аварийной скважины прекратился через 22-23 секунды после взрыва, факел погас. Выход радиоактивных продуктов на поверхность и в стволы пробуренных на месторождении скважин отсутствовал. Ствол аварийной скважины зацементирован от глубины 1040 м до устья.

Успешно были проведены работы по ликвидации газовых фонтанов на Памукском месторождении в Узбекистане, Майском месторождении в Туркмении и на Крестищенской газовой залежи на Украине.

Неудачей закончилось использование ядерно-взрывной технологии при ликвидации аварии на Кумжинском месторождении вблизи устья р. Печоры в 50 км на север от г. Нарьян-Мар. Причиной неудачи было отсутствие достоверных данных о пространственном положении аварийной скважины. Газовый фонтан на Кумжинском месторождении был ликвидирован позднее с помощью наклонных скважин обычными средствами [87].

5) Захоронение биологически вредных промышленных стоков.

Подземный ядерный взрыв средней мощности создает в горных породах зоны трещиноватости протяженностью 100-200 м. Полость обрушения содержит 100-150 тыс. м³ разрушенной и раздробленной породы с общим объемом свободного пространства до 30-50 тыс. м³ [87]. Это свойство взрыва используется для захоронения опасных промстоков в глубокие геологические формации.

На Стерлитамакском содово-цементном комбинате (в настоящее время Республика Башкортостан) объем сточных вод составлял около 60 тыс. м³/сут. Для их захоронения была использована ядерно-взрывная технология.

В пласте плотных известняков мощностью около 400 м на глубине 2026 и 2123 м в 1973 и 1974 гг. были взорваны два ядерных заряда мощностью по 10 кт ТЭ (объекты «Кама-2» и «Кама-1»). Участок взрывов оборудован под полигон подземного захоронения промходов, который был введен в эксплуатацию в начале 1976

года. В течение 14-ти лет в глубокий изолированный горизонт карбонатных пород закачано более 20 млн. м³ промстоков, содержащих свыше 1 000 т взвешенных твердых частиц (0,05 г/л) [73].

При фильтрации закачиваемых промстоков через центральную зону взрыва происходит частичное радиоактивное загрязнение растворов. Проведенные исследования показали, что в результате разбавления при закачке новых порций отходов и смешения их с пластовыми водами, а также в результате задержки радионуклидов минералами – природными сорбентами – уже на расстояниях 500 – 1 000 м от нагнетательной скважины через 5-6 месяцев закачки удельная активность промстоков снижается до фоновых значений.

По оценкам специалистов ядерно-взрывной способ подземного захоронения имеет широкие перспективы для внедрения. Геологическое строение территории Российской Федерации благоприятно для сооружения аналогичных объектов при глубине залегания поглощающих горизонтов 1 000 – 2 000 м. Это районы европейской части (Поволжье, Рязанская, Оренбургская области) и многие районы Сибири [73].

6) Предупреждение выбросов метана на угольных шахтах.

Экспериментальный ядерный взрыв на шахте «Юнком» в г. Енакиево (Донбасс) был произведен по предложению специалистов Института горного дела им. А.А.Скочинского и ПО Орджоникидзеуголь, одобренному Министерствами угольной промышленности СССР и Украины. Интенсивное воздействие взрывной волны должно было ослабить напряженно-деформированное состояние пластов и в конечном итоге уменьшить вероятность внезапных выбросов. За 15 лет работы шахты «Юнком» было зафиксировано 235 случаев выброса газа и пыли, что стало причиной гибели 60 шахтеров [73].

Ядерный взрыв с условным наименованием «Кливаж» проведен 15 сентября 1979 года на глубине 903 м. Мощность взрыва 0,3 кт ТЭ определялась условиями обеспечения сейсмической безопасности шахтных стволов и подземных выработок, а также зданий и сооружений на поверхности. В момент взрыва и после него проводились радиационные исследования, включающие измерения уровней радиации и состава газов в наблюдательных скважинах, в горных выработках и на поверхности. Определялись содержания радионуклидов в шахтных водах и донных отложениях прудов-отстойников. Радиоэкологический контроль, проводившейся на протяжении более 10 лет, не выявил загрязнений, связанных с влиянием произведенного ядерного взрыва. После аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) в объектах внешней среды фиксировалось повышенное содержание радиоактивных изотопов цезия с характерным для «чернобыльского» следа отношением $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, равным 0,54.

Министерство угольной промышленности СССР оценило положительно результат эксперимента и определило вторую шахту в Донбассе для проведения взрыва, однако из-за объявленного моратория, а затем распада Советского Союза работы были приостановлены.

7) Дробление апатитовой руды Хибинского месторождения.

Использование ядерных взрывов для дробления крупных рудных залежей определялось высокой стоимостью и продолжительностью подземных разработок ценного минерального сырья, каким являются апатитовые руды Хибинского мест-

рождения на Кольском полуострове. Специалистами ВНИПИПромтехнологии был предложен способ, при котором на расстоянии 45-60 м/кт^{1/3} от концевой зарядного бокса предварительно проходится отрезная щель и горизонтальная подсечка, выполняющие при взрыве роль свободной поверхности, способствующей дроблению массивных пород.

Кроме того, создавались дополнительные выработки – специальные каналы, по которым радиоактивные продукты взрыва выбрасываются в свободные изолированные объемы и там захораниваются. Прототипами такого обустройства зарядной камеры можно считать ядерный взрыв «Marvel», проведенный в США в 1967 году с целью разработки способов максимальной консервации под землей радиоактивных продуктов взрыва. Аналогичные задачи решались на Семипалатинском полигоне при взрывах в штольнях гранитного массива в 1971 и 1974 гг. [73].

Для дробления руды на месторождении Куэльпор (в 21 км от г. Кировска) было выбрано рудное тело мощностью 30-60 м и длиной около 200 м. На этом участке (объект «Днепр») в 1972 году был произведен взрыв мощностью 2,1 кт ТЭ, а в 1984 году – взорваны два заряда по 1,7 кт ТЭ каждый, разнесенные на 75 м.

Одиноким взрывом был раздроблен блок апатитовых пород размером 50×50×50 м, групповым – блок размером 50×125×90 м. Общее количество раздробленной руды составило 1,55 млн. т. В добываемой руде концентрация радионуклидов не превышает допустимых пределов и составляет по ⁹⁰Sr менее 2 Бк/кг, а по ¹³⁷Cs менее 5 Бк/кг.

Впервые в мировой практике получены экспериментальные данные, позволяющие использовать ядерно-взрывные технологии для крупномасштабного дробления рудных тел.

8) Разработка ядерно-взрывной технологии получения актинилов.

В 50-60 гг. в США проводились ядерные взрывы по программе синтеза трансурановых элементов. В продуктах термоядерного взрыва Майк (Mike) мощностью 10,4 Мт ТЭ, проведенного 1 ноября 1952 г. на атолле Эниветок (Маршаловы острова), были обнаружены ранее не известные элементы, получившие название эйнштейний и фермий [86]. Дальнейшие исследования других термоядерных взрывов показали преимущества взрывного синтеза трансурановых элементов по сравнению с их реакторным получением.

В начале 60-х годов во Всесоюзном научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ, г. Саров) начались работы по использованию нейтронов ядерных зарядов для наработки целевых изотопов [73]. Возможны следующие виды воздействия нейтронов на стартовый изотоп (мишень):

- отрыв нейтрона от ядер мишени за счет реакции ($n, 2n$);
- однократный захват нейтронов ядрами мишени;
- многократный захват нейтронов одним ядром.

В качестве мишени рассматривались ядра ²³²Th и ²³⁸U. В первом виде воздействия возникают ядра ²³¹Th и ²³⁷U, которые при последующем бета-распаде переходят в ²³¹Pa и ²³⁷Np. Во втором случае получают ²³³Pa и ²³⁹Np, переходящие в делящиеся ²³³U и ²³⁹Pu. В третьем процессе на мишени из ²³⁸U образуется целый ряд трансурановых элементов.

К одному из вариантов взрывной наработки изотопов относится процесс получения ²³⁹Pu на стартовом изотопе ²³⁸U:



В качестве стартового материала следует использовать отвальный ^{238}U , в котором содержание ^{235}U составляет примерно 0,2%.

Возможна взрывная наработка изотопа ^{233}U на ^{232}Th :
$$^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th}(\beta^-; 22,3 \text{ мин}) \rightarrow ^{233}\text{Pa}(\beta^-; 27 \text{ сут}) \rightarrow ^{233}\text{U}.$$

Очевидно, что для производства изотопной продукции методом подземных ядерных взрывов необходимо сравнительно простое извлечения целевых изотопов из продуктов взрыва – окончательных минеральных форм их стабилизации. При взрывах в силикатных породах продуктом переработки будут силикатные стекломассы, перемешанные с раздробленной породой. Переработки таких новообразований с извлечением целевых радионуклидов в больших масштабах нецелесообразна и в настоящее время практически недоступна.

Специалисты Радиевого института им. В.Г. Хлопина (А.С. Кривохатский) и ВНИИЭФ (Ю.С. Замятин) предложили в качестве вмещающей геологической среды взрыва использовать каменную соль, что радикальным образом устраняло технологические и радиохимические проблемы переработки изотопного сырья [73].

Одновременно анализ направления в целом, показал, что проблема ядерно-взрывной наработки изотопов должна решаться комплексно и одновременно по трем основным научным направлениям: ядерно-физическому, геолого-минералогическому и радиохимическому. Естественно, что все натурные испытания должны были гарантировать радиоэкологическую безопасность [87, 88].

Большой объем исследовательских работ по изучению ядерных взрывов в каменной соли был проведен в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина. Их результаты представлены фондовыми материалами 1966-1986 гг., а позднее докладами и публикациями. Геохимическое направление исследований наиболее полно изложено в диссертации [89]. В дальнейшем рисунки (фотографии) и таблицы из этой диссертационной работы приведены без ссылки.

5. Солянокупольная структура Большой Азгир. Площадка «Галит»

В 1961 г. в качестве благоприятной площадки для проведения подземных ядерных взрывов в каменной соли специалистами Радиевого института им. В.Г. Хлопина А.С. Кривохатским и Д.С. Николаевым была предложена солянокупольная структура Большой Азгир, расположенная в краевой западной части крупнейшей в мире Прикаспийской соленосной провинции [75]. Позднее утвердили название площадки «Галит» с официальным владельцем – Южной сейсмической экспедицией (ЮСЭ).

Прикаспийская впадина – древнейшая и стабильная по характеру своего развития составная часть русской платформы – является территорией регионального развития солевых формаций. Площадь впадины около 550 тыс. км², количество соляных структур превышает 1200. Соленакпление началось 270-275 млн. лет назад в нижнепермское время и продолжалось почти 10 млн. лет. В настоящее время глубина залегания подсолевых пород в центре впадины достигает 8-9 км [90].

В начале триаса (~ 250 млн. лет назад) начинаются сложные процессы соляного тектогенеза, сопровождающиеся перераспределением соляных масс. Толчком к активизации пород и росту соляных куполов послужили региональные тектонические движения подсолевого фундамента. Соляные структуры Прикаспийской впадины, как правило, пространственно связаны с глубинными разломами палео-

зойских и докембрийских пород, а так же с более глубинными образованиями земной коры [91].

Рост куполов происходил неоднократно и неравномерно, совпадая обычно по времени с крупными тектоническими фазами региона, тектоническими ритмами, проявляющимися с интервалами около 60 млн. лет:

- в нижнем триасе, ~ 245-250 млн. лет;
- в нижнюю юру, ~ 190 млн. лет;
- в нижнем меле, ~ 130 млн. лет;
- в начале палеоцена, ~ 65 млн. лет;
- в верхнем плиоцене, около 2 млн. лет назад.

Рельеф Прикаспийской впадины формировался под влиянием нескольких трансгрессий и регрессий Каспийского бассейна. В позднем плиоцене (~ 2 млн. лет назад) произошли две основные трансгрессии – акчагыльская и апшеронская. В четвертичное время (~ 1,5 – 0,5 млн. лет) – бакинская, хазарская и хвалынская. Современный рельеф связан с отступлением Хвалынского моря 10 тыс. лет назад. За это время наиболее активные купола образовали локальные возвышенности с относительными отметками до 40-50 м (Индер, Богдо и др.), выделяющиеся на фоне аккумулятивных равнин.

Солянокупольная структура Большой Азгир отмечена поднятием Чапчачи – грядой холмов длиной 3 км, шириной 1,5 км с относительными отметками до 20 м и абсолютными отметками до +15,4 м. Возвышенность вытянута с юго-востока на северо-запад и имеет кратерообразную форму благодаря присутствию в ее центральной части бессточной впадины, постоянно заполненной соевым раствором (рапой). Береговые поднятия разрушены мелкими оврагами (рис. 29). Возвышенность образовалась на участке выхода штока каменной соли на дневную поверхность и известна как источник легкодоступной соли для населения и животных в течение многих лет [92].



Рис. 29. Возвышенность Чапчачи. Коренные выходы каменной соли высотой до 6 м на обрывистых берегах соленого озера [92].

Наиболее ранние документальные сведения о месторождении каменной соли Чапчачи (по-киргизски Арзагар) вблизи п.Азгир относятся к 1768 г. В 1772 году академик Петербургской АН С.Г. Гмелин (1745-1774) обратил внимание на этот источник ценного сырья. Несколько позднее профессор Петербургского горного института Н.П. Барбот де Марни (1829-1877) отнес каменную соль Чапчачи к пермскому периоду солеобразования.

Для добычи соли на Чапчачи были созданы два шахтных ствола глубиной около 40 м. В течение 1865-1885 гг. было добыто более 220 тыс. т соли, содержащей 98,61 % масс. хлористого натрия [92]. Добытую соль по грунтовым дорогам переправляли на берега Ахтубы и Волги (~ 100 км) для погрузки на баржи. В дальнейшем по ряду экономических причин основная добыча соли была сосредоточена на озере Баскунчак, и работы на шахтах Чапчачи прекратились.

Выбранная для проведения экспериментальных взрывов площадка «Галит» расположена на территории Денгизского района Атырауской (бывшей Гурьевской) области, вблизи поселка Азгир и границы Астраханской области Российской Федерации (рис. 30). По территории Астраханской области примерно в 100 км от площадки «Галит» протекают реки Ахтуба и Волга, проходит железнодорожный путь Москва – Астрахань. Ближайшая железнодорожная станция «Харабалинская» с районным центром г. Харабали находится в 80 км от поселка Азгир. Юго-западнее площадки «Галит», в 120 км, расположен город Астрахань; на северо-западе на расстоянии 360 км – город Волгоград.

Ближайшие к рабочим площадкам Восточного соляного купола, где было произведено наибольшее количество взрывов, являются населенные пункты – Азгир (16-20 км), Балкудук (40-45 км), Асан (25-30 км), Новый Уштаган (60 км). В ближнее окружение входят также кошары с населением 10-15 человек – Мехтей, Бале, Мекул, Даукен, Шукыр и др. Все они были включены в перечень объектов регулярного контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды [93].

Рельеф района – полого-волнистая равнина с отдельными группами барханных перемещающихся песков (4-6 м) и многочисленными понижениями, в которых в период дождей скапливаются атмосферные осадки. В засушливое время года, накопившаяся в понижениях вода испаряется, и они превращаются в такыры и со-ры.

Климат резко континентальный, засушливый. Среднегодовое количество осадков 149-159 мм. В летний период осадки выпадают преимущественно в виде ливней с грозами. В осенне-зимние и весенние периоды часты туманы. Среднемесячные температуры приведены в таблице 10.

Таблица 10. Ежемесячные температуры в районе площадки «Галит» [75]

	Температура по месяцам (°С)											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Средняя	-9,2	-8	11,1	9,2	17,2	22,5	25,3	23,6	16,5	8,3	0,3	-5,5
Максимум	11	16	23	33	39	42	44	44	39	30	20	12
Минимум	-37	-41	-31	-14	-5	-1	6	4	-5	-12	-30	-37



Рис. 30. Расположение площадок и объектов проведения подземных ядерных взрывов в солянокупольной структуре Большой Азгир (площадка «Галит»), в соляных формациях вблизи Оренбургского газоконденсатного месторождения (объекты «Магистраль» и «Сапфир»), на Астраханском (объект «Вега») и Карачаганакском (объект «Ли́ра») газоконденсатных месторождениях.

В холодные периоды (ноябрь-март) у поверхности земли и в приземном слое атмосферы до высоты 1,5-2,0 км преобладают ветры восточных направлений. С наступлением весны (апрель) увеличивается повторяемость ветра западной четверти горизонта. В летний период наблюдаются ветры преимущественно западного направления. В целом, летние ветра имеют неустойчивое направление. Среднемесячная скорость ветра в течение года изменяется у поверхности земли от 3,7 до 5,0 м/с, а на высотах 3-5 км – увеличивается до 7,6-9,5 м/с. При максимальной скорости приземного ветра до 20 м/с образуются характерные для района пыльные бури.

Общая площадь солянокупольной структуры Большой Азгир составляет около 420 км². Поднятие представляет сложную брахиантиклинальную складку диапирового типа, состоящую из двух локальных положительных структур – За-

падного и Восточного Азгира, разделенных компенсационной мульдой Ужантатор (рис. 31).

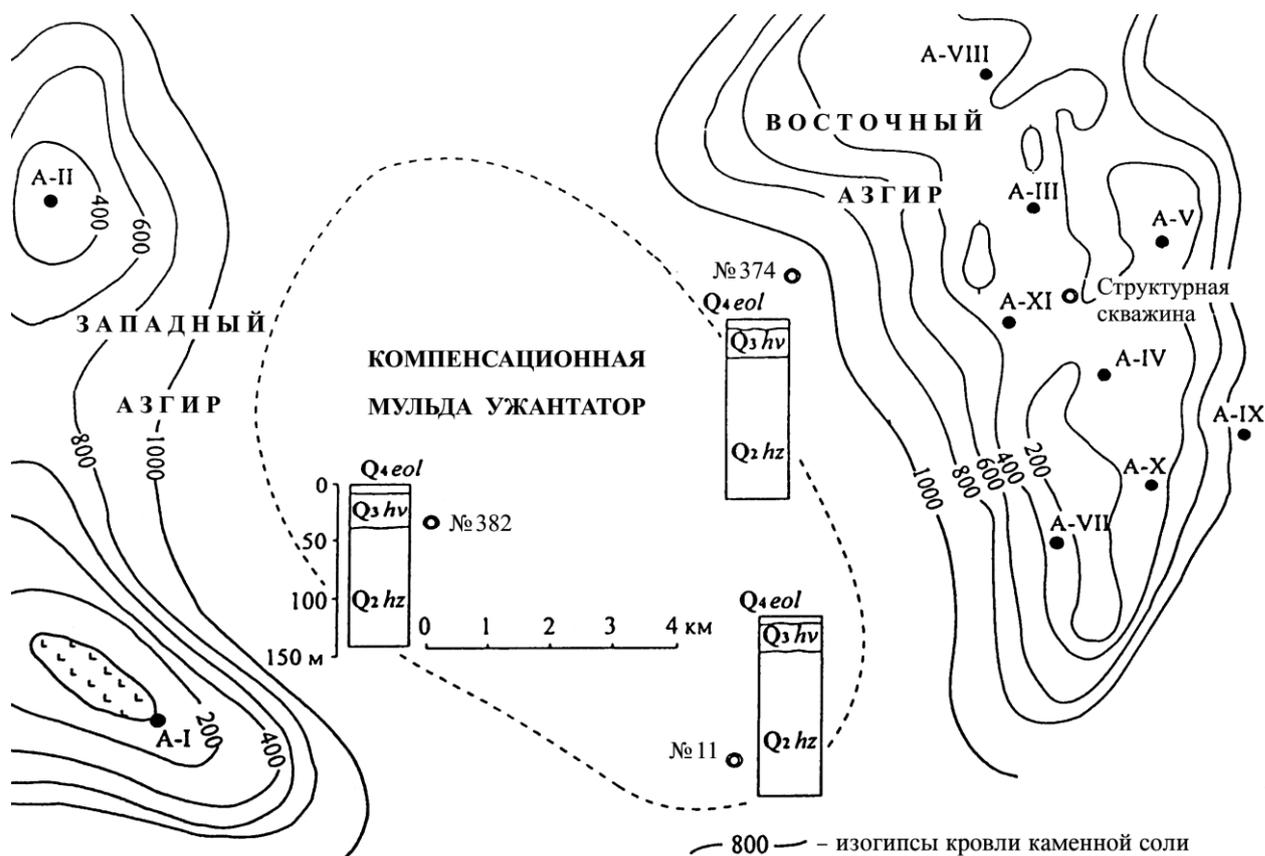


Рис. 31. Солянокупольная структура Большой Азгир. А-I – А-X – скважины, в которых производились взрывы.

Западное поднятие состоит из небольшого солевого штока, прорвавшего вышележащие породы с непосредственным выходом каменной соли на поверхность (возвышенность Чапчачи), а также крупного закрытого купола – Западный Азгир с глубиной залегания солей около 300 м, расположенного в 8-11 км севернее Чапчачи. Восточное поднятие – закрытый купол, вытянутый в субмеридианальном направлении на 10-12 км, в котором глубина кровли солей составляет 200-500 м. Расстояние между Западным и Восточным поднятиями 10-13 км. На разделяющем участке расположена компенсационная мульда. Это характерные для Прикаспийской низменности структуры, образующиеся по окраинам соляных куполов в связи с оттоком пластичной соли, что приводит к прогибанию надсолевых отложений.

В компенсационной структуре Большого Азгира – мульде Ужантатор – соляные породы залегают на глубине 2-2,5 км, а компенсационный прогиб заполнен в основном песчано-глинистыми четвертичными отложениями хазарского яруса.

При формировании солянокупольной структуры происходило образование различных по масштабам участков и зон пластических и разрывных деформаций. Наиболее интенсивные нарушения происходили в приконтактных частях куполов, и особенно по периферии прорывающего осадочные породы соляного штока (возвышенность Чапчачи).

Каменная соль структуры Большой Азгир относится к кунгурскому ярусу нижней Перми – 275 – 270 млн. лет. Галит средне-, крупнозернистый. В зонах перекристаллизации размеры кристаллов достигают 3-5 см.

По составу примесных минералов выделяются два разновозрастных типа галитовых пород:

- ранней фазы соленакопления с прослоями глинисто-карбонатного материала, представленной породами штока Западного Азгира;
- основной, более поздней фазы соленакопления с примесью ангидрита, представленной в куполах Западного и Восточного Азгира.

Выделенные разновидности каменной соли несколько различаются по таким свойствам, как плотность, пористость и влажность (табл. 11).

Таблица 11. Свойства разновидностей каменной соли структуры Большой Азгир

Свойства, от – до среднее	Каменная соль с примесями доломита и глин (142 образца)	Каменная соль с примесью ангидрита (104 образца)
Удельный вес, г/см ³	<u>2,14 – 2,21</u> 2,16	<u>2,16 – 2,22</u> 2,19
Пористость, %	<u>0,70 – 7,79</u> 2,9	<u>0,19 – 5,00</u> 1,46
Влажность, %	<u>0,03 – 1,03</u> 0,16	<u>0,025 – 0,10</u> 0,055

Более существенные различия солей как среды взрыва определяются присутствием газообразующих карбонатов. Для соляных пород с примесью карбонатов при температурах выше 500°C количество выделяющегося диоксида углерода составляет 2 000 см³/кг и выше. При отсутствии карбонатов, в солях с примесями ангидрита аналогичная величина не превышает 150 см³/кг [94]. Именно присутствие примесных карбонатных минералов будет определять состав и давление газовой фазы в полостях, образующихся в соляных породах после взрывов.

Солянокупольная структура Большой Азгир представлена двумя основными минералогическими разновидностями представленными несколькими типами соляных тел, различающихся соотношениями со вмещающими породами и внутренней структурой соляного массива (табл. 12).

Совокупность условий Большого Азгира предоставляла широкие возможности для проведения экспериментальных подземных ядерных взрывов, поскольку:

- в качестве вмещающей геологической среды выбраны однородные пермские соляные породы, имеющие глобальное распространение и высокий уровень изученности;
- в структуре Большого Азгира присутствуют различные по составу примесных минералов и по условиям залегания соляные массивы, крупные закрытые купола и выходящий на поверхность локальный соляной шток Чапчачи ;
- район является малонаселенным, с плотностью населения 2-3 чел/км²;
- рельеф местности равнинный, пустынно-степной с отдельными участками песчаных полужакрепленных массивов;
- климат района засушливый со среднегодовым количеством осадков 149-159 мм;
- в районе отсутствуют крупные потоки мигрирующих подземных вод;

- площадка «Галит» расположена в 80 км восточнее железнодорожной станции «Харабалинская», с которой она связана грунтовой дорогой;
- по условиям рельефа и поверхностного покрова технические площадки на всей территории имеют транспортную доступность.

Таблица 12. Особенности строения и состава примесных минералов различных компонентов солянокупольной структуры Большой Азгир

Характеристики	Западный Азгир		Восточный Азгир			
	Южный участок	Северный участок				
Тип соляной залежи	Соляной шток с крутыми склонами	Соляной купол с пологими крыльями	Соляной купол со сложным рельефом кровли			
Соотношение с вмещающими породами	Шток прорывает вмещающие породы и выходит на дневную поверхность	Закрытый купол	Закрытый купол			
Внутренняя структура	Крутопадающие соляные пласты под углами 60-90°	Пологое падение пластов под углами 20-30°	Интенсивно дислоцированные соляные породы			
Примесные водонерастворимые минералы: – состав минералов	Доломит, кальцит, монтмориллонит	Ангидрит	Ангидрит			
– состав водонерастворимого остатка (ВНО), масс. %						
CaO				50,4	40,5	38,3
MgO				28,8	0,9	3,4
SiO ₂				16,6	0,3	4,5
Fe ₂ O ₃				0,7	0,1	–
SO ₃				–	57,8	55,0
Сумма R ₂ O ₃				1,6	0,5	1,7
– среднее содержание ВНО, масс. %				1,5	3,8	1,0

Первоначально площадка «Галит» ориентировалась на взрывной синтез изотопов и получение энергетического пара. Однако после проведения первого взрыва А-1 на соляном штоке Чапчачи возник ряд предложений, связанных с возможностью получения в солях устойчивых полостей – создание хранилищ для углеводородного сырья, захоронение радиоактивных отходов, экспериментальная проверка степени увеличения полостей при проведении в них повторных взрывов с оценками снижения сейсмического эффекта и пр.

Возможности площадки «Галит» позволяли провести крупные комплексные научно-экспериментальные работы по изучению следующих вопросов [75]:

- пространственное и фазовое распределение радионуклидов в подземном пространстве;
- механизм образования и фиксации газовой фазы;
- способы управления составом и количеством новообразованных минералов и газовых фаз;
- состав и свойства парогазовой фазы и методы ее очистки (или переработки);
- возможность последовательного расширения полости путем производства повторных взрывов;
- механическая и термическая устойчивость скважин и забивочного комплекса;
- устойчивость полости в течение длительного времени;
- способы экспрессного пробоотбора газа и твердой фазы;
- методы промышленного извлечения продуктов подземных ядерных взрывов (ПЯВ);
- строение подземной зоны ПЯВ и экологические последствия ПЯВ;
- поведение подземных вод;
- механическое и сейсмическое воздействие ПЯВ в такой неоднородной среде, как погребенный соляной купол.

Для решения поставленных задач были привлечены специалисты различных научно-исследовательских институтов и специализированных организаций Советского Союза – Всесоюзного научно-исследовательского института технической физики (ВНИЭФ) («Арзамас-1б», позднее г. Саров); ВНИИПромтехнологии (г. Москва); Радиевого институт им. В.Г. Хлопина (г. Ленинград); Института прикладной геофизики Госкомгидромета СССР (г. Москва); Института физики Земли Академии наук СССР (г. Москва); Всесоюзного научно-исследовательского института галургии (г. Ленинград); Восточного горно-обогатительного комбината (г. Желтые Воды); организаций по проведению буровых работ Министерства среднего машиностроения (позднее Минатома) (г. Лермонтов, г. Селятино) и др.

Все работы по ядерно-взрывной наработке изотопов возглавил академик Ю.Б.Харитон, а на площадке «Галит» – доктор физико-математических наук В.Б. Адамский.

Сотрудники Радиевого института участвовали в ядерных испытаниях 1949-1962 гг., начиная с первого наземного ядерного взрыва на Семипалатинском полигоне, после которого были отобраны пробы и определена величина коэффициента полезного использования (КПИ) ядерного горючего радиохимическими методами [95]. В 1964 году специалисты Радиевого института им. В.Г.Хлопина принимали участие в работах по первому вскрытию центральной зоны подземного ядерного взрыва, проведенного в штольне В-1 на Семипалатинском полигоне. При этом радиохимическое научное направление института получило существенное дополнение в части геолого-минералогических и геохимических исследований. По результатам последних были выделены структурно-геохимические зоны взрыва в гранитоидах, разработана генетическая классификация твердых продуктов взрыва и, что весьма существенно, определены критерии представительности проб эксплозитов – радиоактивных взрывных новообразований.

Руководителями исследований по «взрывной» тематике были директор института, член-корреспондент АН СССР В.М. Вдовенко и начальник созданного в 1973 году отдела, доктор химических наук А.С.Кривохатский.

Работами на площадке «Галит» Радиевому институту требовалось подтвердить эффективность традиционного комплексного подхода к решению сложных

проблем при взаимодействии физического, радиохимического и геохимического научных направлений. При этом большинство исследований проводилось в достаточно сложных экспедиционных условиях, а большинство методических приемов и технологии разрабатывались впервые. Например, геохимические аспекты проблемы ядерно-взрывной наработки изотопов рассматривали возможность создание искусственного (техногенного) месторождения, которое по своим основным свойствам удовлетворяло требованиям, предъявляемым к природным аналогам. В процессе развития ударно-термального метаморфизма целевой изотоп должен быть сконцентрирован в локальном объеме новообразованных продуктов взрыва, которые могут быть извлечены на поверхность, обогащены, а целевой изотоп – выделен существующими методами радиохимической технологии.

В 1964 году, до проведения взрыва А-1 и до появления первых публикаций о продуктах взрыва «Сэлмон», геохимики Радиевого института разработали прогноз вероятных свойств искусственного месторождения для условий каменной соли штока «Чапчачи» [96].

Природные аналоги не были обнаружены, поскольку до настоящего времени неизвестны случаи образования ударных метеоритных кратеров в соляных породах. Кроме того, отсутствуют и метаморфические аналоги соленосных толщ.

Известно исследование термического воздействия на залежи каменной соли Усольской свиты Сибирской платформы интрузии долеритового состава на глубинах 2-3 км. Температура в зоне контакта превышала 800°C. В результате термального метаморфизма в солях с прослоями карбонатных и карбонатно-сульфатных пород образовалась приконтактная зона форстерит-шпинель-серпентинитовых пород с ангидритом и реликтами периклаза [97].

Исходя из общих кристаллохимических закономерностей высокотемпературных процессов кристаллизации, первовыделениями должны быть свободная СаО (температура плавления 2570°C) и MgO (температура плавления 2500°C). В дальнейшем образуются наиболее простые кристаллические структуры типа шпинели или шпинелеподобной модификации оливина [98].

Был проведен лабораторный эксперимент по нагреву до 1200°C водонерастворимого остатка каменной соли, отобранной на участке предполагаемого взрыва А-1. В результате из смеси карбонатно-глинистых минералов (см. табл. 12) образовался шлакообразный агрегат, в состав которого вошли новообразованные высокотемпературные минералы группы пироксенов и оливина. Последние представляют силикаты с непрерывными цепочками тетраэдров SiO₄ (магнезиальные, железистые и кальциевые пироксены) и силикаты с изолированными тетраэдрами SiO₄ в кристаллических структурах (группа оливина). Для этих минералов характерно изоморфное замещение катионов, представленных Mg, Fe, Mn, Ni, Co, Zn, Ca и Pb [36]. Следовало допустить, что в результате ядерного взрыва в солях новообразованные высокотемпературные минералы окажутся носителями радионуклидов высокотемпературных элементов, таких как Zr, Ce, Pu и др.

Полученные в лабораторных условиях шлаки с добавками плутония и америдия сравнительно легко растворялись в азотной кислоте с полным переходом трассерных радионуклидов в раствор.

Распределение новообразованных минералов и их шлаков в полости взрыва и в консолидированном солевом расплаве определяло дальнейшую технологию разработки искусственного месторождения. При сравнительно равномерном распределении по всей массе переплавленной соли (~ 1000 т на 1 кт мощности) требо-

вალასь переработка (добыча и растворение) значительных количеств радиоактивного материала с транспортировкой больших объемов пресной воды и последующим захоронением радиоактивных хлоридно-натриевых растворов, например, в песчаные пласты компенсационной мульды Ужантатор.

О ликвационных процессах в солевом расплаве с последующим образованием донной линзы высокордиоактивных продуктов (см. рис. 27), как это произошло при взрыве «Сэлмон», в то время еще не было известно. Статья Rawson D., Randolph P., Boardeman C. et al. Post-explosion environment resulting from the Salmon event опубликована в Journal Geophysical Research в конце 1966 [84]. v. 71, No 14, pp. 3507-3521.

В породах солянокупольной структуры Большой Азгир в 1966-1979 гг. проводились подземные ядерные взрывы в течение 1966-1979 гг. – первичные, в каменной соли, повторные в ранее созданных полостях, а также групповые (табл. 13). Промышленные площадки наземного обустройства, скважины для размещения ядерных зарядов и образующиеся после взрывов полости индексировались буквой «А» и порядковым номером проведения взрыва в римской нумерации от А-I до А-XI. Повторным взрывам присваивалась дополнительная обычная нумерация: А-II-2, А-II-3 и т.д. Взрыв А-IV не производился. При взрыве А-IX заряд был заложен не в каменной соли, а в глинах перекрывающей толщи. После обрушения полости на поверхности образовалась провальная воронка диаметром около 500 м.

Из 17-ти экспериментальных взрывов, проведенных на площадке «Галит», только при 3-х произошло неконтролируемое истечение радиоактивных газов. Это взрывы с нештатной радиационной ситуацией А-I, А-II, А-VIII. Все остальные были полностью камуфлетными [87].

Ядерные взрывы проводятся не просто «под землей», а в определенной геологической формации, в конкретных горных породах, которые существенным образом изменяются под воздействием ударного метаморфизма. При ядерном взрыве в природную геологическую среду внедряется большая группа техногенных радионуклидов, которые распределяются по различным структурно-геохимическим зонам, имеют различные формы минеральной стабилизации и миграционные возможности. Изучение всей совокупности этих явлений определяет необходимость, а в ряде случаев и прерогативу, геологических и радиогеохимических исследований при проведении подземных ядерных различного целевого назначения. Привлечение к работам по этому ключевому научно-исследовательскому направлению Радиевого института им. В.Г.Хлопина учитывало тематику его геохимического отдела, соединение и взаимосвязь в структуре и деятельности института физического, радиохимического и геохимического направлений, большой опыт проведения экспедиционных работ и, естественно, участие в исследованиях первых ядерных взрывов на Семипалатинском полигоне.

Проведение подземных ядерных взрывов с последующим вскрытием взрывных полостей, стравливанием парогазовой смеси, проведением геофизических и пробоотборных операций относится к работам повышенной радиационной опасности, требующим постоянного радиационного контроля персонала, населения, внешней среды. На площадке «Галит» постоянный дозиметрический контроль и радиационный мониторинг окружающей среды осуществлялись сотрудниками Радиевого института им. В.Г.Хлопина [75, 93].

Таблица 13. Перечень и параметры подземных ядерных взрывов, проведенных на площадке «Галит» в 1866-1979 гг., с использованием данных [73, 87]

Индекс взрывов и полости	Дата проведения	Глубина заложения заряда, м	Мощность взрыва, кт ТЭ	Состояние полости и её некоторые параметры
1	2	3	4	5
А-I	22.04.1966	161	1,1	В полость вскоре после взрыва начала поступать вода, которая и заполнила ее через 7 дней. Радиус полости ~ 14 м, из-за обрушения свода свободный пролет ниже кровли составил 18 м. Общий объем ~ 10 000 м ³ . Полость и участок взрыва разбурены 6-ю скважинами. На полости смонтирована добывающая гидросистема «Эрлифт».
А-II	01.07.1968	591	27	Полость через 9 дней заполнилась водой. Радиус полости – 32 м, свободный объем – 125 000 м ³ . Для исследований в донную часть полости пробурены две скважины.
А-II-2	25.04.1975	583	0,35	Все повторные взрывы проведены в водозаполненной полости.
А-II-3	14.10.1977	582	0,1	
А-II-4	30.10.1977	582	0,01	
А-II-5	12.09.1978	584	0,08	
А-II-6	30.11.1978	585	0,06	
А-II-7	10.01.1979	581	0,5	
А-III	22.12.1971	986	64	Радиус полости 39 м, свободный объем – 215 тыс. м ³ . Через технологическую скважину осуществлены геофизическое обследование полости и отбор проб.
А-III-2	29.03.1976	986	10	Повторный взрыв.
А-IV	29.07.1976	997	58	Радиус полости 38 м, свободный объем 200 000 м ³ . Геофизическое обследование полости и отбор проб проведены через технологическую скважину.
А-V	30.09.1977	1491	10	Радиус полости 15 м, свободный объем 9 500 м ³ . Геофизические исследования проведены через технологическую скважину.
А-VII	17.10.1978	986 1041	20-150 <20	Первый групповой взрыв в солях с суммарным энерговыделением 73 кт. Свободный суммарный объем полостей 210 000 м ³ .
А-VIII	17.01.1979	930 1004	<20 20-150	Групповой взрыв с суммарным энерговыделением 65 кт. Свободный суммарный объем полостей 240 000 м ³ .
А-IX	18.12.1978	630	103	Взрыв в надсолевых глинах с образованием провальной воронки.
А-X	24.10.1979	917 980	<20 20-150	Групповой взрыв с суммарным энерговыделением 33 кт. Свободный суммарный объем полостей 120 000 м ³ .
А-XI	14.07.1979	849 917 983	<20 <20 <20	Групповой взрыв с суммарным энерговыделением 21 кт. Свободный суммарный объем полостей 100 000 м ³ .

Выполнение научно-исследовательских программ проводилось поэтапно. Содержание и объемы работ отдельных этапов со временем уточнялись и дополнялись.

- 1) Подготовительный этап. Выбор точки и разбуривание технологической скважины, при котором проводятся геофизический каротаж, изучаются свойства каменной соли на участке взрыва. Составляется прогноз состава и параметров парогазовой смеси в образующейся полости. Перед началом работ в 1965 году сотрудниками Радиевого института им. В.Г. Хлопина были сняты фоновые характеристики загрязнения окружающей среды в радиусе 70-100 км от пос. Азгир и по левому берегу Волги [75]. В дальнейшем измерения естественных уровней радиации на территории проводилось с учетом возможных аномалий после проведенных ранее взрывов и технологических операций. На больших площадях измерения осуществлялись автомобильными радиометрами с непрерывной записью и многократными измерениями на контрольных точках. Для первичной обработки проб (почва, растительность, атмосферные выпадения, аэрозоли приземного слоя воздуха, воды колодцев и естественных водоемов и пр.) и последующих измерений на низкофоновых радиометрических установках типа УМФ-1500, Б-4 были выделены специальная «чистая» площадка и помещение.
- 2) Проведение взрыва. Оперативное обследование технологической скважины, смонтированных систем газоотбора и стравливания, ближайшего к технологической площадке района радиационными автомобильными дозорами (РАД). В дальнейшем Радиевым институтом была разработана и смонтирована на базе автомашины «Урал» установка «Тунец» с проводными и радиальными датчиками дистанционного контроля радиационной обстановки. Установка «Тунец» использовалась не только на площадке «Галит», но и на других объектах проведения подземных ядерных взрывов, а в мае 1986 года переправлена на Чернобыльскую АЭС [99].
- 3) Стравливание из полостей парогазовой смеси, в состав которой входят радиоактивные благородные газы, изотопы криптона и ксенона. Стравливание – единственный этап проведения взрывов, во время которого существует потенциальная опасность облучения населения и загрязнения территории за пределами промплощадок. В зависимости от программы проведения взрыва стравливание может быть ранним (управляемым для исследовательских целей, для проведения повторного взрыва в водозаполненной полости). Сюда же следует отнести неконтролируемую утечку для взрывов с нештатной радиационной ситуацией. Во время позднего стравливания в парогазовой смеси преобладают тритий и криптон-85. При этом варианте разрабатывался регламент подготовки и передачи в эксплуатацию полостей-хранилищ нефтепродуктов. Условия проведения экспериментальных взрывов и имеющаяся аналитическая аппаратура позволяли определять радионуклидный состав и количества стравливаемой парогазовой смеси. Первоочередной научно-методической задачей этого этапа являлась разработка оперативного представительного пробоотбора. Для специфических условий площадки «Галит» в Радиевом институте им. В.Г.Хлопина в сотрудничестве с Дзержинским ОКБА (Донецкая область, Украина) был сконструирован и создан малогабаритный автономный хроматограф, который демонстрировался на Выставке достижений народного хозяйства СССР (ВДНХ).
- 4) Проведение пробоотбора, в который входят все технологические операции в пределах промплощадок по извлечению на поверхность радиоактивных проб

жидкостей и твердых материалов. На этом этапе существует реальная возможность загрязнения грунта, оборудования, инструментов, спецодежды и облучение персонала. Для извлечения проб использовались и разрабатывались различные методы и пробоотборники (скважинные батометры, устройства для отбора донных проб, шламовые трубы, омоноличивание рыхлых соляных пород в зоне навала и пр.). Для изучения извлеченных проб на площадке «Галит» сотрудникам Радиевого института им. В.Г.Хлопина были построены две лаборатории. Первая – вблизи поселка ЮСЭ на северном окончании соляного штока, вторая – над полостью взрыва А-I, где монтировалась гидродобывающая установка «Эрлифт». Лаборатории охранялись, были обеспечены электро- и водоснабжением, имели шкафы и боксы со спецвентиляцией и различное аналитическое и приборное оборудование, приспособленное для работы с радиоактивными материалами. Для проведения натуральных исследований по размыву (ВНИИ Галургии) и нагреву (Радиевый институт им. В.Г. Хлопина) в каменной соли штока Чапчачи на небольшую глубину разбуривались специальные скважины.

- 5) Этап радиационно-экологического обследования территории, дезактивация загрязненных площадок, захоронение радиоактивных отходов. Весь комплекс работ и исследований этого этапа осуществлялся практически после каждого проведенного взрыва или после крупных технологических операций с большим количеством радиоактивного материала (работа установки «Эрлифт», извлечение на поверхность крупных проб из полостей взрывов пр.), а также по завершению работ и консервации технологических скважин [93].

Радиационная обстановка на всех технологических площадках постоянно контролировалась специалистами Радиевого института им. В.Г.Хлопина и ВНИИЭФ [75]. Данные дозиметрического контроля двух институтов, отвечавших за радиационную безопасность на площадке «Галит» подтверждены данными контроля, проведенного в 1991 году СЭС Гурьевской области и лабораторией радиоэкологии № 9 ВНИИ Геоинформсистем (г. Москва).

- 6) Изучение процессов миграции радионуклидов по соляному массиву по результатам обследования наблюдательных скважин. Последний отбор проб из этих скважин, разбуренных вблизи полостей взрывов А-I, А-II, А-III, А-IV, А-V проведен в 1991 г., т.е. через 14-25 лет после проведения взрывов [100]. Это был завершающий этап экспериментальных научно-исследовательских работ на площадке «Галит».

5.1. Радиоактивные продукты и структурно-геохимические зоны взрыва А-I

Физико-химические, механические и структурно-минералогические изменения пород при воздействии ядерного взрыва близки с природными процессами ударного метаморфизма, сопровождающимися испарением, плавлением и дроблением горных пород [71]. Ударный метаморфизм является частью общей фундаментальной проблемы изучения распределения и перемещения элементов в геологической среде для выявления закономерностей и причин фиксации или миграции этих элементов. Установленные закономерности природного ударного метаморфизма используются при исследованиях ядерно-взрывных изменений горных пород [42].

Для решения ключевых задач была создана площадка «Галит» и в течение 1966-1979 гг. осуществлялись экспериментальные ядерные взрывы. Они позволили:

- определить условия создания искусственного месторождения изотопов методом ядерно-взрывной технологии;
- разработать регламент подготовки взрывных полостей для использования их в качестве хранилищ газконденсата;
- определить формы нахождения и распределение техногенных радионуклидов, разработать критерии их локализации после проведения подземных ядерных взрывов.

Наиболее детально до проведения и после проведения взрыва была изучена юго-восточная часть соляного штока Чапчачи в районе технологической площадки А-I. Дальнейшие исследования полостей взрывов А-II, А-III, А-IV и пр. дополняли и развивали радиогеохимические аспекты и прикладное использование ядерно-взрывных технологий [101, 102].

Первый экспериментальный взрыв А-I был произведен 22 апреля 1966 г. в юго-восточной части соляного штока, в его краевой части, где каменная соль перекрыта лишь маломощными (6-8 м) песчано-глинистыми породами хвалынского яруса, отложениями последней самой молодой трансгрессии Каспия в четвертичное время. Каменная соль представлена крупнозернистой полосчатой породой, в которой слои светлого галита (10-20 см) чередуются с темными прослоями глинисто-карбонатного состава (0,5-1 см). Падение солевых пластов на северо-восток крутое – под углами 60°-90°. Встречаются зоны перекристаллизации галита шириной до 2-3 см. Химический состав и свойства каменной соли на участке взрыва А-I приведен в табл.11, 12.

Примесные карбонаты представлены доломитом с примесью кальцита (10-15%), глинистых минералов, гидрослюд, сирлезита. Водонерастворимый остаток составляет от 0,24 до 4,05 % по весу, в среднем – 1,5%. На долю карбонатов приходится 1,1%, глины составляют 0,3%.

Связанная вода (прокаливание до 500-600°С после удаления гигроскопической влажности) составляет для солевых пород от 0,35 до 1,49%. В образцах керна – это водоупорная порода с коэффициентом фильтрации менее 0,01 м/сут. Водопроявлений в соляной толще на участке взрыва не обнаружено. Однако наблюдалось поступление в скважины высокоминерализованных рассолов (~300 г/л) с дебитом не более 0,001 л/сек.

Геологический разрез юго-восточного склона соляного штока Западный Азгир (Чапчачи) представлен на рис. 32 и в табл. 14.

Технологическая скважина А-1 разбуривалась вблизи структурной скважины № 1042.

Мощность надсолевых отложений (хвалынские пески, суглинки) по стволу скважины А-I составляет около 7 м. На прилегающем к скважине участку хвалынски пески и молодые четвертичные (лиманные) отложения обводнены за счет атмосферных осадков. Водный режим этих пород существенным образом зависит от микрорельефа, близости небольших озер (такыров), глубины ближайшего водоупора.

Озерно-лиманные воды высокоминерализованные – до 306 г/л. Коэффициент фильтрации прослоев лиманных глин – 0,007 – 0,04 м/сут. Разгрузка озерно-лиманных вод верхнего водоносного горизонта происходит в нижележащие породы хвалынского яруса.

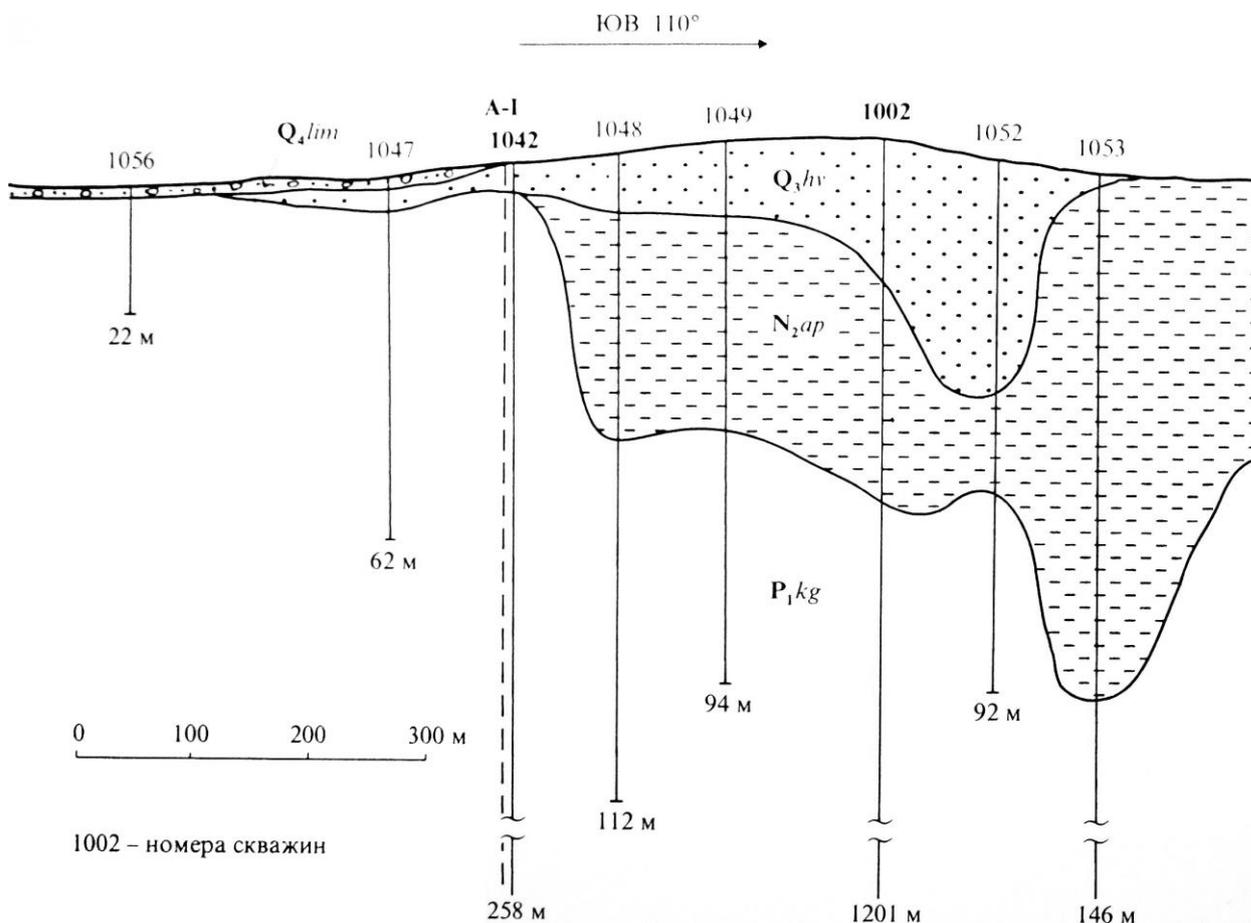


Рис. 32. Геологический разрез юго-восточной части соляного штока Западный Азгир на участке проведения взрыва А-І. Q_3^{hv} – пески с прослоями песчаников и суглинков четвертичных пород хвалынского яруса; N_2^{ap} – глинистые породы неогена апшеронского яруса.

Таблица 14. Геологический разрез юго-восточного склона соляного штока Западный Азгир (Чапчачи).

№№ скважин	Суглинки, глины, супеси Q_4^{lim} *	Суглинки, глины, супеси, пески Q_3^{hv}	Глины, пески N_2^{ap}	Каменная соль P_1^{kg}
1056	до 2,3 м	–	–	2,3 – 22,0 м
1047	до 2,8 м	2,8 – 7,0 м	–	7,0 – 62,0 м
1042	–	до 5,8 м	–	5,8 – 258 м
1048	–	до 11,0 м	11,0 – 50,4 м	50,4 – 112 м
1049	–	до 13,6 м	13,6 – 50,1 м	50,1 – 94 м
1002	–	до 22,0 м	22,0 – 61,7 м	61,7 – 1201 м
1052	–	до 41,1 м	41,1 – 57,6 м	57,6 – 92 м
1053	–	до 2,3 м	2,3 – 90,6 м	90,6 – 146 м

*– четвертичные лиманные отложения.

Воды неогеновых пород (апшеронский ярус) приурочены к прослоям и линзам песков, имеющих мощность от долей метра до 6,6 м. Водопроницаемость песков низкая, в связи с присутствием в них значительной примеси глин. Коэффици-

ент фильтрации варьирует от 0,012 до 0,65 м/сут. Наблюдается закономерное увеличение минерализации вод с глубиной (табл. 15).

Таблица 15. Химический состав подземных вод апшеронского яруса

Компоненты, мг/л	Глубина отбора проб:	
	24,0 м	126,5 м
Cl ⁻	16 997	74 870
SO ₄ ²⁻	2 792	1 893
HCO ₃ ⁻	909	6
Na ⁺ + K ⁺	6 709	42 294
Ca ²⁺	1 240	1 880
Mg ²⁺	2 391	535
Сухой остаток	37 746	144 720

Северо-западнее технологической скважины А-I (700-800 м) в соляных породах обнаружены прослой пирокластического материала (туффита) [103]. Находка свидетельствовало о том, что формирование пермских галогенных отложений на территории Прикаспийской низменности было связано с процессами вулканической деятельности. Ранее было известно синхронное соленакоплению проявление вулканизма для Индерского купола, что подтверждалось возрастом магнезиального мусковита пепловых туфов – 250-270 млн. лет [42].

Мощность туффитовых прослоев в соляном штоке Западного Азгира достигает 1 м. Это плотная порода, сохранившая первичную слоистость и узловатую текстуру. Туфы липаритового типа содержат 68-75% оксида кремния, 15-20% оксида алюминия, 2-6% оксида калия и 4-5% оксида натрия. Основная масса порода представлена пепловым материалом с примесью обломков вулканического стекла. При этом обломки вулканического стекла имели остроугольные формы (рис.33) и содержали газовые включения.

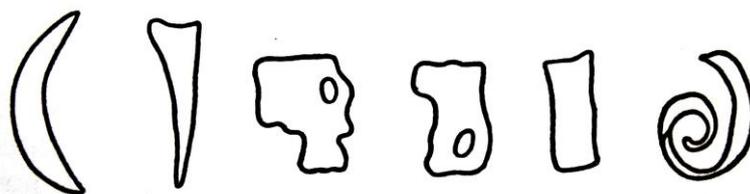


Рис. 33. Форма обломков вулканического стекла в туффитах Западного Азгира. Фракция < 0,25 мм [103].

Установлен крайне важный факт – в прошедшем стадию активного внедрения соляном штоке сохранились стратиграфические прослой привнесенного вулканического материала. Алюмосиликатные стекла туффитов в течение почти 250 млн. лет были полностью изолированы в соляной толще и сохранили свои первичные обломочные формы.

Проведенные разведка и геолого-гидрогеологическое изучение позволяли охарактеризовать и определить особенности участка размещения скважины А-I:

- для проведения взрыва малой мощности выбрана юго-восточная оконечность соляного штока Чапчачи, где каменная соль перекрыта песчано-глинистыми отложениями мощностью 6-8 м;
- присутствие брекчий на контактах соляного штока с окружающими породами свидетельствует об активности процессов диапиризма вплоть до послеапшеронского времени (~ 2 млн. лет назад);
- крутое падение соляных пластов будет способствовать развитию и распространению над полостью взрыва трещин и миграцию по ним газообразных радионуклидов;
- развитие послевзрывных трещин за пределами или на границах соляного штока может создать каналы для проникновения в полость подземных вод.

Перед проведением взрыва А-I вблизи технологической площадки были заложены и частично разбурены несколько исследовательских скважин с целью проведения экспресс-отбора проб из донной части образовавшейся взрывной полости и для наблюдений за газово-гидрогеологическим и радиационным режимами (табл.16).

Таблица 16. Параметры исследовательских скважин, пробуренных на участке проведения взрыва А-I.

№№ скважин	Расстояние от скважины А-1, м	Азимут от скважины А-1	Глубина разбуривания, м
1087	5,5	240°	88,3
1073	20,0	240°	180,8
1074	50,0	283°	180,0
1043	98,0	137°	60,0
1045	150,0	96°	50,0
1056	280,0	290°	90,0

Все исследовательские скважины перед взрывом были заполнены насыщенным соевым раствором (рапой).

В момент взрыва подъем грунта в эпицентре составил 2 м. На местности в радиусе около 60 м вокруг скважины А-I образовались радиальные и кольцевые трещины с раскрытием грунта до 15-20 см. Обсадная труба скважины № 1087 приподнялась на 25 см. Исследования параметров сейсмозрывных волн в ближней (до 2,3 км), средней (4,5-7,5 км) и дальней (до 270 км) зонах и проведенные расчеты позволили оценить сейсмическое воздействие равносильное землетрясению в 6-7 баллов [85].

После взрыва через разгерметизированное затрубное пространство скважины А-I и через исследовательские скважины происходила утечка радиоактивных благородных газов, в составе которых были идентифицированы:

- криптон-85 ($T_{1/2} = 10,3$ года);
- ксенон-133m ($T_{1/2} = 2,3$ дня);
- ксенон-135 ($T_{1/2} = 9,13$ часа).

Мощность экспозиционной дозы на оголовке скважины А-I по замерам, проведенным РДА через 12 минут после взрыва, составила ~ 1 Р/час.

Через 30 минут после взрыва наблюдалось понижение уровня водных растворов (~ 0,5 м/час) и засасывание воздуха в контролируемые скважины №№ 1087,

1073, 1074 и 1043. Начался процесс заполнения водой полости взрыва, который происходил в несколько этапов:

- в течение 35 часов после взрыва по образовавшимся трещинам происходило просачивание подземных вод к полости;
- после 35 часов наблюдавшееся всасывание воздуха на скважинах сменилось выходом газов и резким ростом мощности экспозиционных доз (на оголовке скважины А-I до 3 600 Р/час). Водные растворы проникли в разогретую полость взрыва;
- интенсивный выход полостных газов происходит в течение 15 часов до момента остывания полости. Позднее на исследовательских скважинах наблюдается повторное всасывание воздуха (в полость интенсивно поступает вода);
- через 90 часов после взрыва происходит повышение давления на скважинах, сопровождавшееся истечением радиоактивных газов в течение 70-80 часов. Заполняющая полость вода выдавливала оставшиеся в полости и в зоне трещиноватости газы;
- через 160-170 часов (~ 7 суток) после взрыва произошло резкое прекращение газовыделения на всех наблюдательных скважинах. Полость полностью заполнилась соевым раствором.

На поверхности преобладающее распространение трещин произошло в радиусе ~100 м от скважины А-I. Отдельная трещина, по которой происходило истечение радиоактивных газов, была обнаружена в 125 м западнее скважины. Она образовалась в кровле соляного штока, перекрытой суглинками мощностью от 1 до 2-х метров на береговом участке такыра (рис. 34) .

Через 15 суток после взрыва через вертикальную скважину № 1087, пройдя зону навала, удалось извлечь небольшое количество радиоактивной переплавленной соли из донной линзы водонаполненной полости. В пробе были обнаружены высокоактивные темные шлаковые частицы, отдельные из которых имели сферическую форму.

На 21 сутки наклонно-горизонтальная скважина № 1056 прошла ~ 10 м по горизонтальному сечению линзы переплавленной соли на максимальном расстоянии 3-4 м от дна полости. По всему сечению соль имела однородный состав, исключая узкую краевую контактную зону. Отсутствие на значительном участке переплавленной соли обломков кровли, как это наблюдалось для взрыва «Гном» [79], свидетельствовало, что обрушение кровли полости взрыва А-I и образовании навала произошло после консолидации основной массы соляного расплава.

В донной части переплавленной соли в сравнительно узкой зоне сконцентрировались высокоактивные силикатно-железистые сферические частицы (гранулы) и шлаки. Не имея информации о составе и характере распределении продуктов взрывов, проведенных в каменной соли в США, советские специалисты по результатам исследований первого взрыва на площадке «Галит» получили собственные данные о неоднородном строении линзы переплавленной соли и подтвердили прогноз образования высокотемпературных силикатных минералов [42, 89].

В дальнейшем, в июне – ноябре 1966 г., были проведены пробоотбор, обследование полости и окружающего ее массива шестью вертикальными скважинами на расстояниях от 5 до 36 метров по азимутам 135° и 240° от скважины А-I (рис. 34).

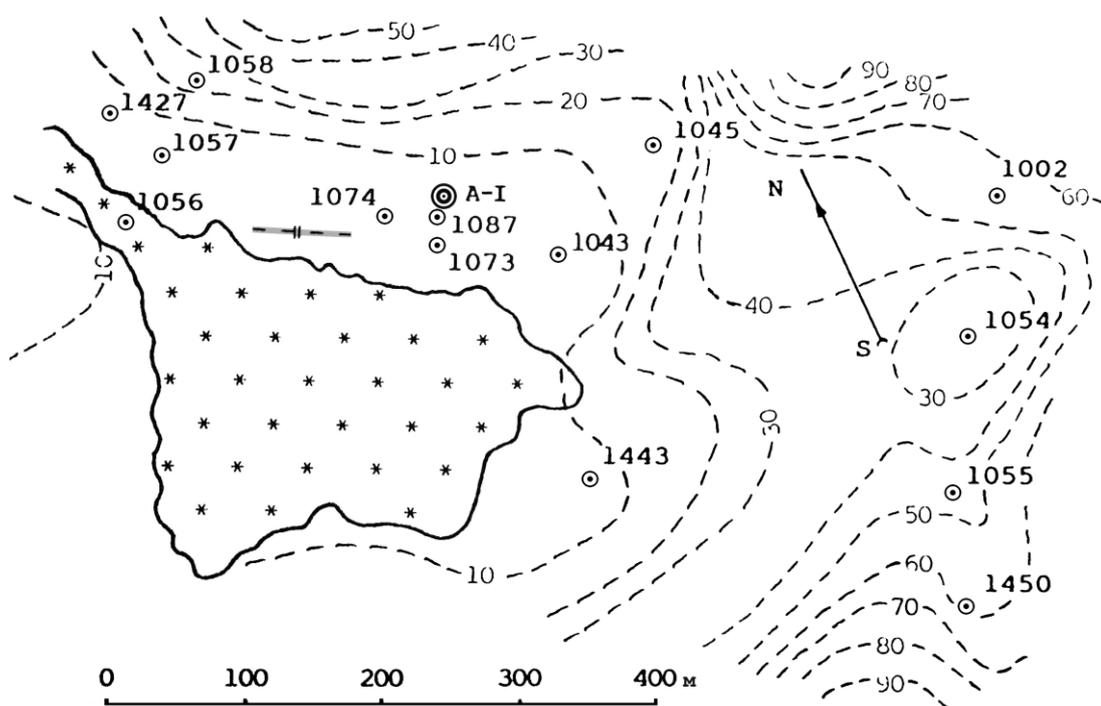


Рис. 34. Расположение исследовательских скважин на участке взрыва А-І.

Условные обозначения:

- ⊙ 1002 – номера скважин;
- 30- – изогипсы глубины залегания каменной соли;
- ||— – взрывная трещина на поверхности каменной соли;
- * * – такыр.

В октябре 1966 года началось разбуривание дополнительных технологических скважин для монтажа гидродобывающей установки «Эрлифт». Для подъема пульпы была расширена скважина 1098, расположенная в пяти метрах от скважины А-І, для сброса в полость рассола использовалась скважина 1100, которая вошла в боковую стенку полости. В октябре 1970 года установкой «Эрлифт» было поднято на поверхность ~ 2 т переплавленной радиоактивной соли из центральной части донной линзы полости. Из этого материала выделено ~ 200 кг концентрата, обогащенного шлаковыми высокоактивными частицами [101].

В процессе монтажа установки «Эрлифт» проведена гидролокация и телевизионное обследование полости. Объем полости зависит от мощности взрыва, упругопластических свойств горной породы и глубины заложения заряда. Для каменной соли [73]:

$$R = 14,5 W^{1/3} (1 - H/H_0),$$

- где R – радиус полости в метрах;
W – мощность взрыва в кт;
H – глубина заложения заряда;
H₀ = 2 800 м.

По окончательным данным полость А-І по форме близка к эллипсоиду вращения, у которого вертикальная полуось больше горизонтальной. Ее максимальная высота 37 м, горизонтальный радиус на уровне заложения заряда – 12-14 м, т.е. близок к расчетным данным. Общий объем полостного пространства ~ 14 тыс. м³. В нижней части полости находится навал обрушенных глыб и обломков каменной

соли из трещиноватой кровлевой зоны объемом ~ 4 тыс. м³. Пустое пространство полости объемом ~ 10 тыс. м³ заполнено насыщенным соляным раствором.

Проведенные после взрыва А-I геохимические исследования позволили установить основные особенности взрывного ударного метаморфизма соляных пород, определить закономерности поствзрывного минералообразования и фиксации техногенных радионуклидов в продуктах взрыва, выделить характерные структурно-геохимические зоны и возможности миграционных процессов на участке соляного штока Чапчачи.

С учетом установленной последовательности кристаллохимических процессов минералообразования и пространственного размещения структурно-геохимических зон взрыва была разработана общая схема развития геохимических фаз ударного метаморфизма ядерного взрыва в каменной соли. Присутствие техногенных радионуклидов в различном фазовом состоянии с различными периодами полураспада определило возможность оценки времени развития отдельных процессов. Начальные, высокотемпературные процессы минералообразования взаимосвязаны с параметрами численного моделирования фаз образования и развития полости взрыва в каменной соли [75]. При выделении структурно-геохимических зон взрыва учитывались данные изучения зональных структур, образующихся при природном ударном метаморфизме (см. гл. 2).

Результаты изучения первого экспериментального взрыва А-I являются базовыми и служат в качестве основного аналога для геохимических исследований проводимых позднее взрывов различного целевого назначения.

При ядерных взрывах в каменной соли образуются структурно-геохимические зоны, которые закономерно располагаются относительно образовавшейся полости и различаются по структурным особенностям, составу и происхождению основных минералов, присутствием характерных техногенных радионуклидов [42, 100] (рис. 35).

В ударной волне взрыва происходит испарение и плавление каменной соли. Масса испарившейся соли при взрыве мощностью 1 кт составляет ~ 107 т, расплавленной соли – ~ 1 000 т [104]. При этом основное количество расплава на стенках полости происходит за счет теплопередачи от паров соли [75]. Через 1-10 сек. после взрыва образовавшийся расплав стекает на дно полости и образует донную линзу переплавленной радиоактивной соли – внутреннюю зону полости.

В зоне испарения, кроме испарившейся каменной соли были обнаружены тугоплавкие компоненты примесных минералов, а также металлы конструкций ядерного устройства (в основном железо).

Температура плавления галита 801°C, что значительно ниже аналогичной величины для многих широко распространенных минералов – оксидов (периклаз MgO, магнетит FeFe₂O₄, шпинель MgAl₂O₄ и др.), силикатов (форстерит Mg₂SiO₄, фаялит Fe₂SiO₄ и др.). В случае своего раннего образования эти высокотемпературные минералы, имеющие, как правило, высокую плотность, будут оседать на дно линзы солевого расплава. При температуре около 900°C вязкость расплава NaCl близка к вязкости воды, а плотность – около 1,2 г/см³ [84].

Общая масса высокотемпературных минералов, по сравнению с количеством переплавленной соли, невелика, однако именно тугоплавкие оксиды примесных минералов солей и конструкционные металлы, в первую очередь железо, являются носителями радионуклидов тугоплавких элементов – Zr, Ce, Eu, Co, Pu и др. [42].

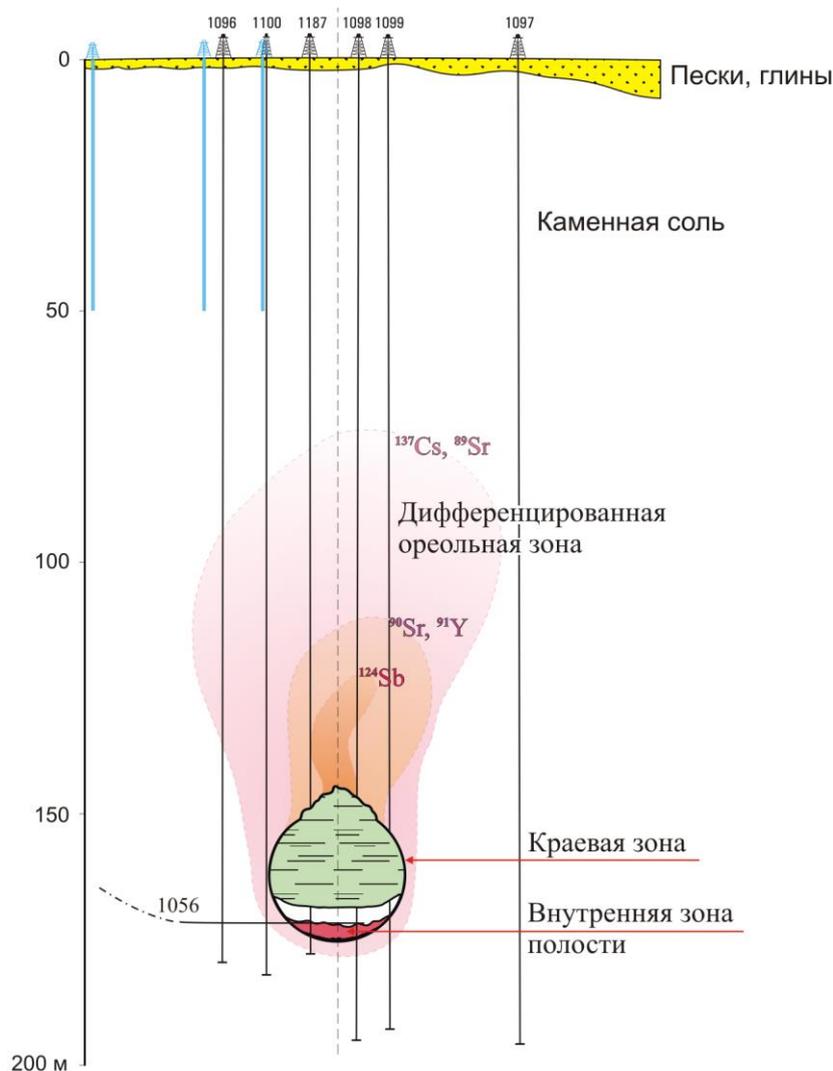


Рис. 35. Структурно-геохимические зоны подземного ядерного взрыва А-1. Голубым цветом показаны наблюдательные гидрогеологические скважины.

Внутренняя зона полости.

Основным радиоактивным минеральным новообразованием внутренней зоны полости является переплавленная каменная соль (галит), образующая линзу в донной части полости (рис. 36). Объем линзы $\sim 500 \text{ м}^3$, масса $\sim 1\,000 \text{ т}$. Непосредственно после извлечения на поверхность переплавленный галит имеет желто-оранжевую окраску, которая быстро исчезает на свету. Окраска связана с радиационными эффектами.

По своей структуре переплавленная соль от средне- до крупнозернистой. Встречаются также и гигантозернистые участки с площадью сколов спайности до $20\text{-}24 \text{ см}^2$.

Отличительной чертой переплавленной соли, определяющей, что это эксплозит, т.е. продукт ударно-термального метаморфизма, является присутствие крупных газовых включений – сферических или в форме извилистых каналов диаметром от 15 до 500 мкм. За счет присутствия газовых включений плотность эксплозита снижается до $1,6 \text{ г/см}^3$, что характерно для верхней части разреза линзы с крупнокристаллическим галитом. Ближе ко дну полости галит становится средне- и мелкозернистым, а его плотность увеличивается до $2,18 \text{ г/см}^3$.

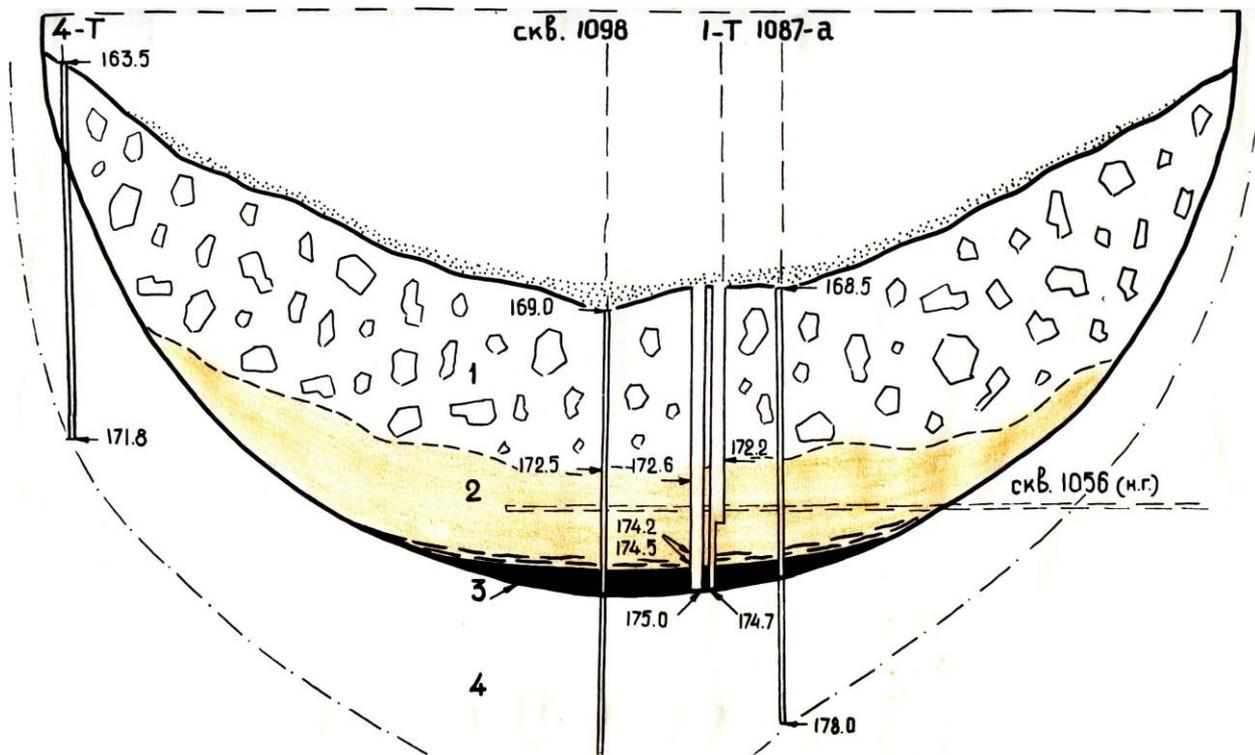


Рис. 36. Строение донной части полости взрыва А-I [89].

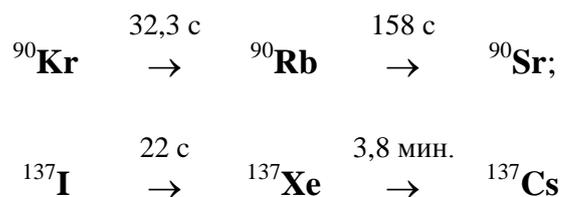
1 – навал обломков пород из кровли полости; 2 – переплавленная желтая соль; 3 – черная соль с силикатно-железистым шлаком и гранулами; 4 – границы развития участков ударного метаморфизма каменной соли.
Цифрами указаны номера скважин и отметки их глубины.

Морфологическим и, отчасти, генетическим природным аналогом структуры переплавленной каменной соли можно рассматривать базальты с трубчатыми пустотами в донных частях лавовых озер [105].

В пробах переплавленной соли, отобранной через 15 суток после взрыва, были идентифицированы: $^{89,90}\text{Sr}$, ^{91}Y , ^{131}I , ^{132}Te , ^{133}Xe , ^{137}Cs , ^{140}Ba . По данным автораддиографий бета-излучающие радионуклиды, в основном ^{90}Sr , сконцентрированы на внутренних поверхностях газовых включений (рис. 37).

Неоднородное распределение радионуклидов в консолидирующемся соляном расплаве связано со сменой физического состояния элементов в цепочках распада.

Такие смены происходят, например, в цепочках распада ^{90}Sr и ^{137}Cs :



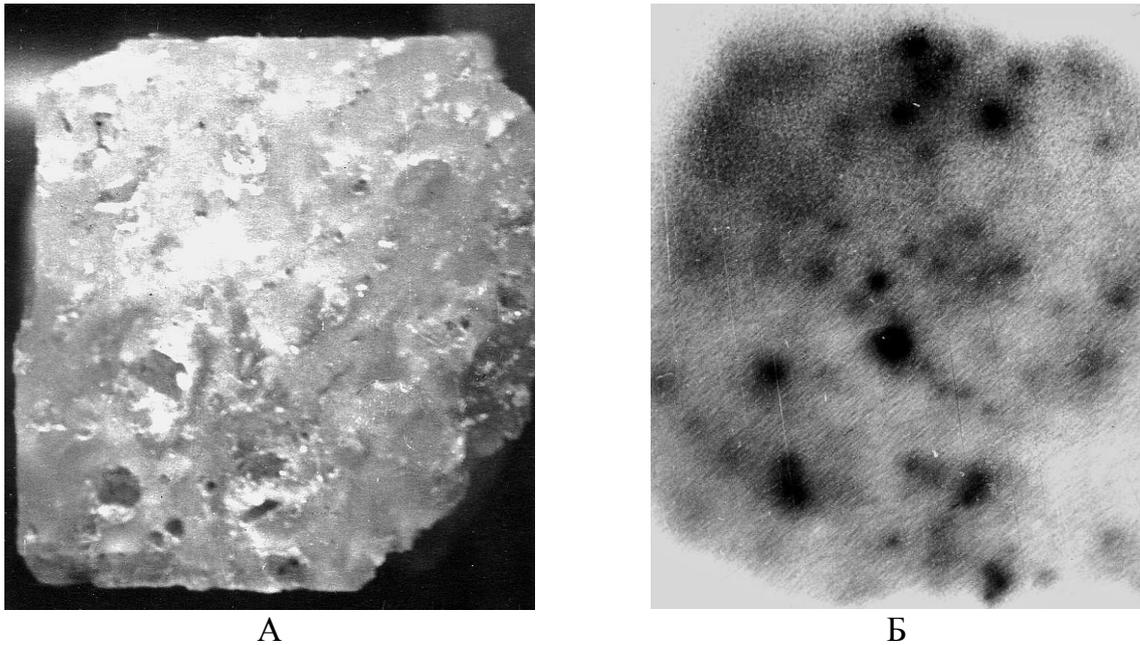


Рис. 37. А – поверхность спайного скола крупного кристалла переплавленной соли с кавернозной текстурой; Б – бета-радиография (пленка РТ-1) образца с кавернозной текстурой (темное – концентрация бета-излучающих радионуклидов). Увеличение 6,5 раз.

Характер распределения радионуклидов в продуктах взрыва позволяет оценить развитие отдельных процессов ударного метаморфизма во времени. В частности, присутствие газовых включений в переплавленной каменной соли внутренней зоны свидетельствует о том, что полной дегазации солевого расплава до его кристаллизации не произошло. Концентрация ^{90}Sr на стенках газовых пустот свидетельствует о его первоначальном нахождении в форме газового предшественника ^{90}Kr с периодом полураспада 32,3 с. Можно допустить, что значительная часть расплава не позднее 5-ти минут после взрыва (~ 10 периодов полураспада ^{90}Kr) стала настолько вязкой, что присутствующие газовые включения потеряли возможность передвигаться и оказались «замурованными» в взрывном галите после его кристаллизации. Кроме того, дегазацию солевого расплава может затруднять растущее давление парогазовой смеси в образующейся полости.

Полученные для взрыва А-Г экспериментальные данные отличаются от результатов математического моделирования развития отдельных фаз ядерного взрыва в каменной соли [75]. По расчетным данным фаза образования расплава и расплавленной линзы в нижней части полости охватывает значительно больший интервал времени – порядка $10^3 - 10^6$ секунд (от 17 минут до 17 суток), а фаза затвердевания расплава может продолжаться в интервале от 12 суток до 3-х лет.

Анализ газов включений в переплавленной соли показал присутствие в них продуктов термального разложения каменной соли – CO , CO_2 , H_2 , CH_4 . Присутствующие радионуклиды являются, как правило, летучими элементами, либо имеют газообразных предшественников (табл. 17). Содержание радионуклидов – изотопов тугоплавких элементов – ниже пределов чувствительности метода.

Таблица 17. Содержание радионуклидов в различных типах взрывных новообразований А-І. Активности радионуклидов приведены по первоисточнику – мКи/г на момент образования [89].

Радионуклиды	Переплавленная соль, скв. 1056	Гранулированный шлак, скв. 1098	Железистые частицы краевой зоны, скв. 1056
Иод-131	$5,4 \cdot 10^{-4}$		
Теллур-132	$2,3 \cdot 10^{-2}$		
Ксенон-133	$2,8 \cdot 10^{-2}$		
Стронций-89	$5,8 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	
Стронций-90	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	
Иттрий-91	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	
Цезий-137	$3,7 \cdot 10^{-5}$		
Барий-140	$4,1 \cdot 10^{-2}$		
Рутений-103			0,06
Рутений-106		0,09	0,20
Цирконий-95		5,8	1,18
Церий-141		0,24	8,1
Церий-144		1,1	0,22
Празеодим-143		25	
Неодим-147		17	
Европий-156		0,41	
Плутоний-239		$1,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Железо-59		$4,5 \cdot 10^{-2}$	
Кобальт-60		$3,5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$

По разрезу центральной части соляной линзы (скв. 1098, 1-Т, 1087-а), на расстоянии ~ 2 м от верхней границы линзы в переплавленной желтой соли появляются прожилки белого мелкокристаллического кальцита (рис. 38), общее количество которого в породе увеличивается с глубиной от 0,1 до 1,2% масс. Состав и содержания радионуклидов в кальците такие же, как в переплавленном галите.

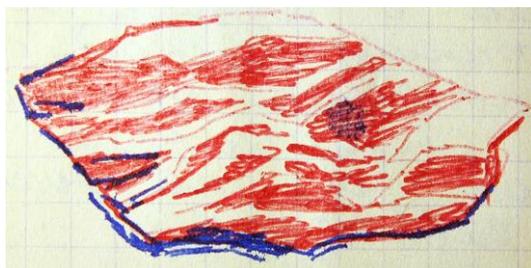


Рис. 38. Переплавленный галит внутренней зоны полости А-І с прожилками кальцита. Образец керна скв. 1-Т. Натур. величина. Зарисовка из полевого журнала экспедиции Радиевого института им. В.Г. Хлопина, Азгир, 1968 г.

В нижней приконтактной части линзы переплавленной соли находится сравнительно узкая придонная зона – внутренняя линза диаметром ~ 6 м с максимальной мощностью по центру полости ~ 1 м. В зоне сконцентрированы новообразованные минералы группы оливина, магнетита, а также периклаз MgO и монтчеллит CaMgSiO₄. Эти минералы входят в состав сферических гранул со средним диаметром 0,5-3 мм и шлаковых частиц с размером до 2-х см. Постоянно присутствуют мелкодисперсные железистые частицы, которые и придают придонной линзе темную, почти черную окраску. В гранулах и шлаках сконцентрировано основ-

ное количество таких радионуклидов, как ^{60}Co , ^{95}Zr , $^{141,144}\text{Ce}$, ^{143}Pr , ^{147}Nd , $^{155,156}\text{Eu}$, ^{239}Pu [89]. Мощность экспозиционной дозы отдельных образцов черной соли с гранулированным шлаком (рис.39) составляла более 1 Р/час через 21-и сутки после взрыва.

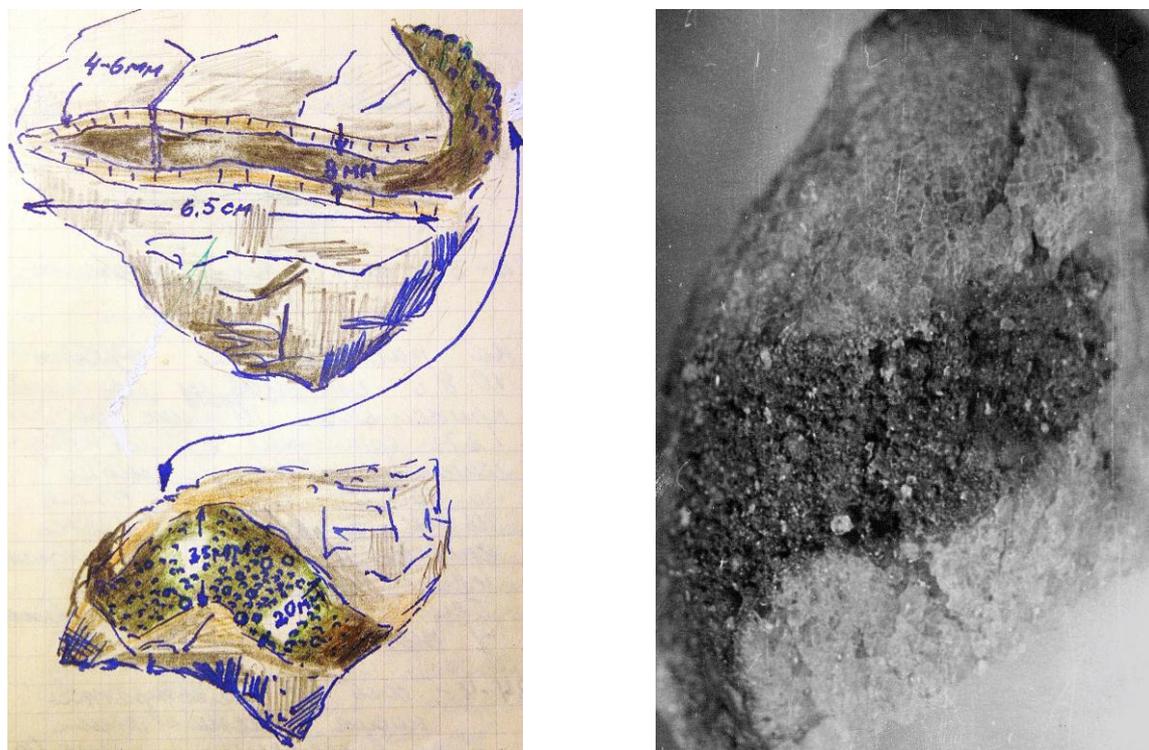


Рис. 39. Внедрение расплава, обогащенного силикатно-железистыми гранулами в каменную соль на участке экзоконтакта (скв. 1-Т, глубина ~ 175 м). Зарисовки из полевого журнала экспедиции Радиевого института им. В.Г. Хлопина, Азгир, 1968 г. и фотография (натур величина).

Скопления гранулированного высокотемпературного шлака после гравитационного осаждения на дно полости могли перемещаться по трещинам в зону экзоконтакта, проникая в соляной массив (рис. 39). По границе раздела «шлакового» расплава и каменной соли присутствует узкая (4-5 мм) зона «закалки», образование мелкокристаллического галита со столбчатой структурой.

Сферические гранулы – характерные продукты наземных и подземных ядерных взрывов, образующиеся на регрессивной стадии ударного метаморфизма в процессе свободного перемещения (падения) расплавленных частиц [42, 89].

В радиоактивных продуктах взрыва «Гном» были обнаружены округлые темные шарики размером 0,5 – 0,01 мм, состоящие из магнетита FeFe_2O_4 , оливина $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ и кирштейнита $\text{CaFe}[\text{SiO}_4]$. Сферическая форма и гладкая поверхность шариков (гранул) могут свидетельствовать об их образовании в виде несмешивающихся капель в расплаве соли [106].

Гранулы взрыва А-Г крупнее, чем взрыва «Гном» (табл. 18).

Поверхность гранул обычно неровная, бугристая. На крупных гранулах присутствуют извилистые трещины остывания, аналогичные структурам «хлебной корки» вулканических взрывных продуктов. Крупные гранулы имеют, как правило, внутреннюю кавернозную структуру, обусловленную присутствием газовых включений, «запечатанных» в быстрозатвердевающих частицах (рис. 40). Присут-

ствие внутренних каверн снижает плотность гранул до $2,1-2,0 \text{ г/см}^3$, но у большинства индивидов эта величина лежит в пределах $2,5- 2,2 \text{ г/см}^3$. Плотность порошковых проб гранул составляет $3,1 \text{ г/см}^3$.

Таблица 18. Распределение гранул взрыва А-I по размерам.

Классы, мм	> 3	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,3	0,3-0,15	0,15-0,05	<0,05
Массовая доля, %	7	21	35	22	7	5	2	1

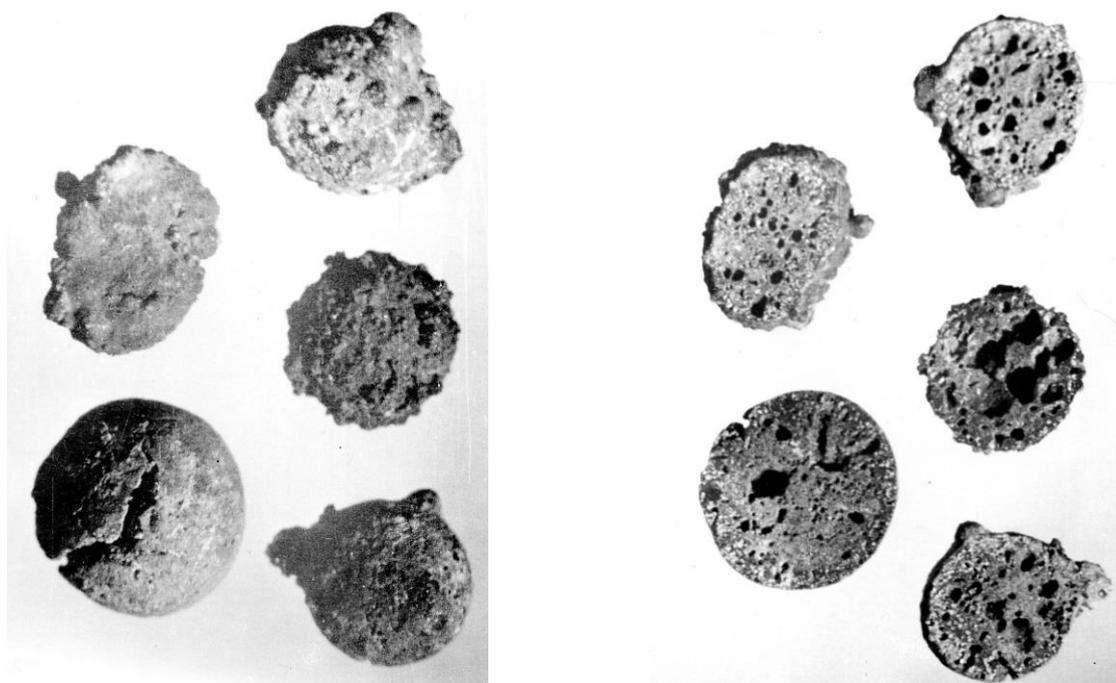


Рис. 40. Внешняя поверхность и срезы крупных гранул (3,5-3,9 мм) с кавернозной структурой.

Размер большинства гранул (78%) находится в пределах $0,5 - 3 \text{ мм}$.

Окраска большинства гранул (80%) темно-серая, черная, и лишь 20% – светлая (рис. 41). Темная окраска связана с присутствием мелкодисперсного магнетита, светлая характерна для гранул оливинового состава.

Концентрация радионуклидов в темноокрашенных гранулах выше, чем в светлых (табл.19). При этом основным окрашивающим фактором является присутствие мелкодисперсных железистых минералов группы магнетита.

Таблица 19. Средние содержания радионуклидов в различно окрашенных гранулах

Окраска гранул	Содержание, мКи/г на момент образования			
	^{239}Pu	^{144}Ce	^{155}Eu	^{60}Co
Черная	0,019	0,86	$4,53 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Серая	0,012	0,30	$3,07 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
Белая		0,035		$5 \cdot 10^{-4}$

Наблюдаются внутренние включения мелких гранул в более крупном индивиде (рис. 42). Количество таких включений может достигать 7-8 и характерно для

светлых оливковых гранул, внутри которых находятся несколько сферических включений темных гранул, содержащих магнетит.

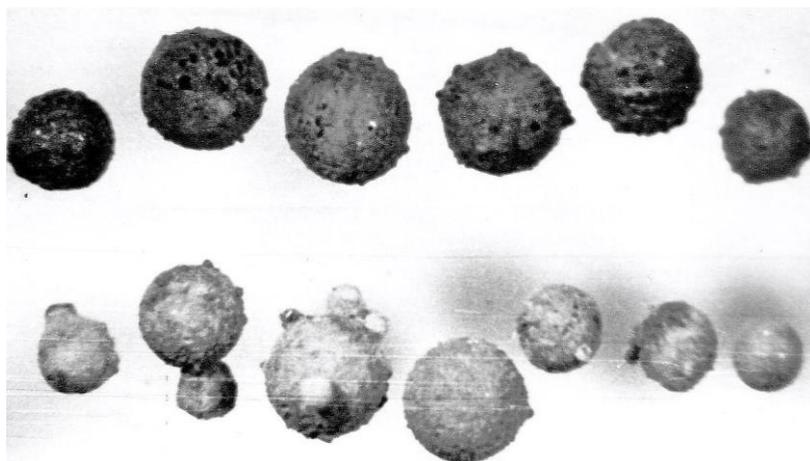


Рис. 41. Темные и светлые гранулы из донной линзы полости А-І. Пятикратное увеличение.

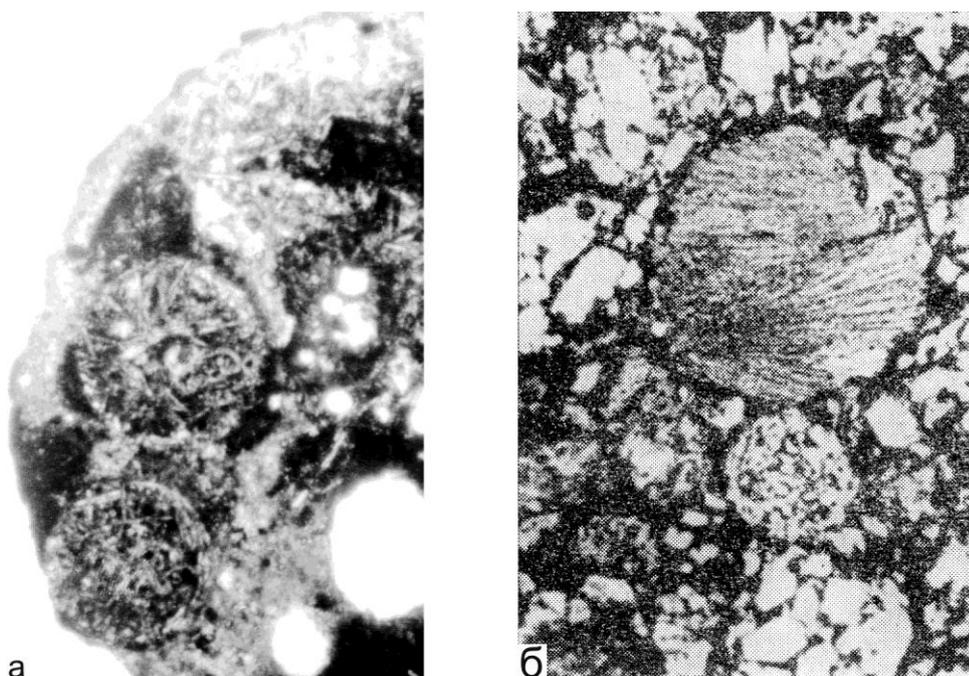


Рис. 42. Хондритовые текстуры: **а** – включения мелких оливковых гранул (0,20 мм) в крупном индивиде (взрыв А-І); **б** – оливковые хондры каменного метеорита [107].

Текстура таких гранул аналогична оливковым хондрам, присутствующим в определенном типе каменных метеоритов – хондритах [107]. Среди специалистов нет единого мнения об условиях образования хондритовых текстур.

Детальные исследования гранулированных шлаков взрыва А-І выявили особенности кристаллизации оливина на начальных стадиях регрессивного метаморфизма.

При снижении температуры внутри полости до 2500-2000°C начинается конденсация высокотемпературных оксидов магния, кальция, кремния, а позднее – железа. Их источниками являются примесные минералы каменной соли и металлические конструкции заряда. Конденсационные частицы имеют округлые формы и размеры 3 – 5 мкм (рис. 43, А). Их поверхность может иметь неровный, «бугристый» характер, сохраняя сферические очертания первичных субмикронных капель конденсации. Следует допустить, что основное количество конденсационных частиц образовалось в узком интервале времени, «сразу и все».

После конденсации происходит агрегация частиц, в том числе образование начальных скелетных форм оливина. В последнем случае преобладают дендритовидные формы, со «стволом» длиной 70-90 мкм и отходящими от «ствола» под прямым углом «ветками», размер которых закономерно изменяется от 25-30 мкм до 6-7 мкм (рис. 43, Б). В дальнейшем пространства между «ветками» заполняются микросферами и вся структура приобретает очертания минерала дипирамидально-призматического габитуса.

Образовавшиеся кристаллы группы оливина сохраняют свое конденсационно-аккреционное происхождение присутствием не полностью раскристаллизованных сферолитов. Наблюдаются своеобразные теневые микросферолитовые структуры вне полностью гомогенизированных призматических кристаллов (рис. 43, В).

На завершающей стадии кристаллизации в оливине исчезают теневые структуры, и минерал приобретает характерный призматический облик с пирамидальными окончаниями (рис. 43, Г). Средний размер таких кристаллов по длинной оси 100-180 мкм. Коэффициент удлинения – 3-7.

Кристаллизация минералов группы оливина сопровождается внутренним структурным перераспределением отдельных компонентов. Происходит «сброс» излишков железа из кристаллической решетки магнезиальных (форстерит) или железо-магнезиальных (оливин) ортосиликатов. Железо в форме прямоугольных кристаллов магнетита и бурых хлопьевидных выделений гематита заполняет пространство между призматическими выделениями ортосиликатов. Одновременно происходит «очищение» последних от плутония, о чем свидетельствуют альфардиографии оливиновых гранул (рис. 44).

Для плутония и его соединений при существующих условиях кристаллизации возможность изоморфного вхождения в решетку магнезиально-железистых ортосиликатов ограничена.

Шлаки представлены частицами неправильной формы с характерной кавернозной, «шлаковой» структурой. В основном это агрегаты различных по составу и структуре минеральных фрагментов, прошедшие стадию слипания и агломерации, но не сформировавшие выделения типа гранул. Образование шлаков, как правило, происходит при резком падении температур, и для условий подземного взрыва А-I может свидетельствовать либо об их более позднем по сравнению с гранулами выделении, либо это выделение происходило в краевых, эндоконтактных зонах полости, где перепады температур наиболее резкие.

В шлаковых частицах обнаружены стекломассы и присутствует не характерный для гранул радиоизотоп сравнительно легколетучего элемента – ^{125}Sb ($0,37 \cdot 10^{-3}$ мКи/г).



Рис. 43. Различные стадии образования минералов группы оливина в процессе агрегации и кристаллизации конденсационных частиц [108]. Объяснение в тексте.

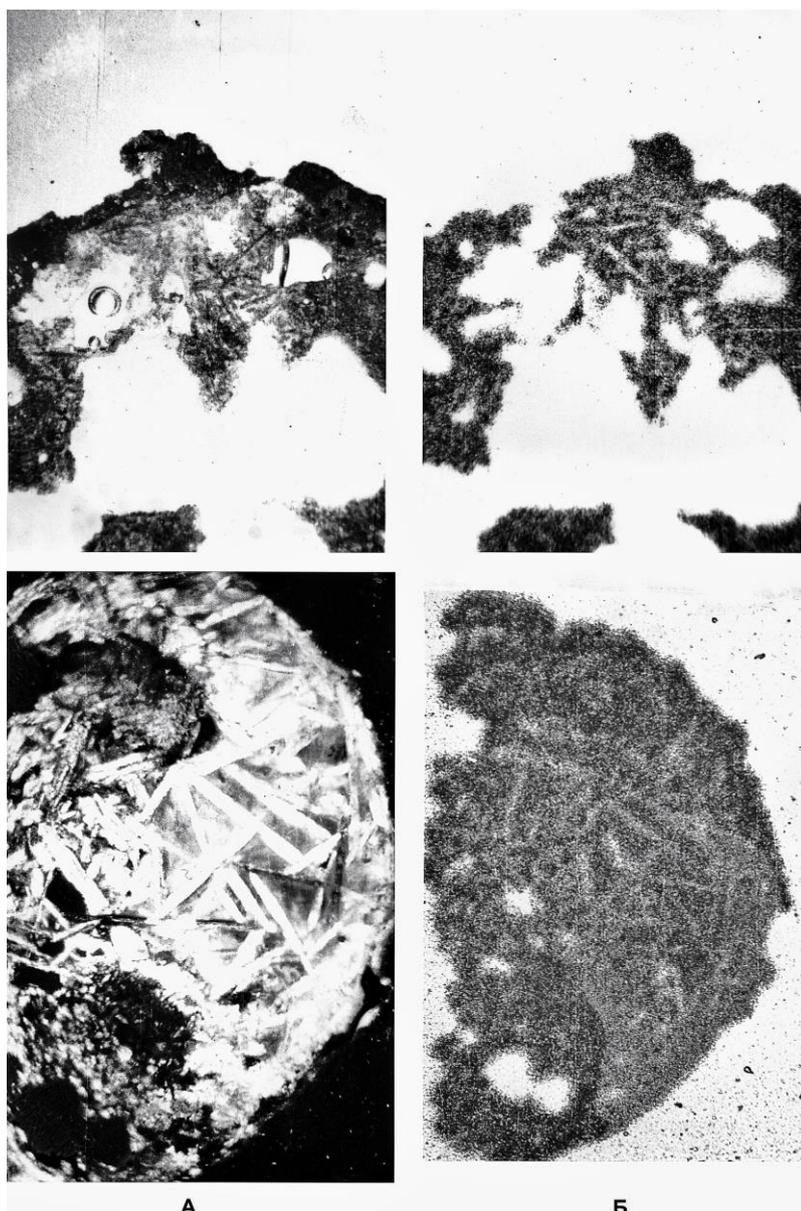


Рис. 44. А – фотографии и Б – трековые радиографии гранул с кристаллами минералов группы оливина. Пояснения в тексте.

На образцах шлаковых частиц установлена четкая пространственная связь минералов железа (группа магнетита) с альфа-излучающим радионуклидом – плутонием (рис. 45). На радиографии альфа-треки отсутствуют в центральной части среза, которая состоит из мелкокристаллической светлой массы минералов группы оливина, и сконцентрированы в краевых частях, обогащенных магнетитом (на фотографии – черная окантовка среза). Образование высокотемпературных ортосиликатов и оксидов железа с плутонием разделено во времени. На поверхности ранее выделившейся силикатной частицы концентрируются оксиды железа и плутоний.

Корреляция между содержанием в образцах железа и содержанием плутония и юрия была установлена после изучения продуктов взрыва «Гном». Но отмечалось, что эти радионуклиды, по-видимому, не ассоциируют с определенным минералом, а присутствуют в виде отдельных фаз, например, окислов [109].

В процессе выделения водонерастворимого остатка из крупной технологической пробы, полученной установкой «Эрлифт», в нем присутствовали гранулы,

шлаки и мелкодисперсные частицы с размерами менее 0,1 мм (табл. 20). В классе < 0,1 мм по составу преобладали железистые минералы.

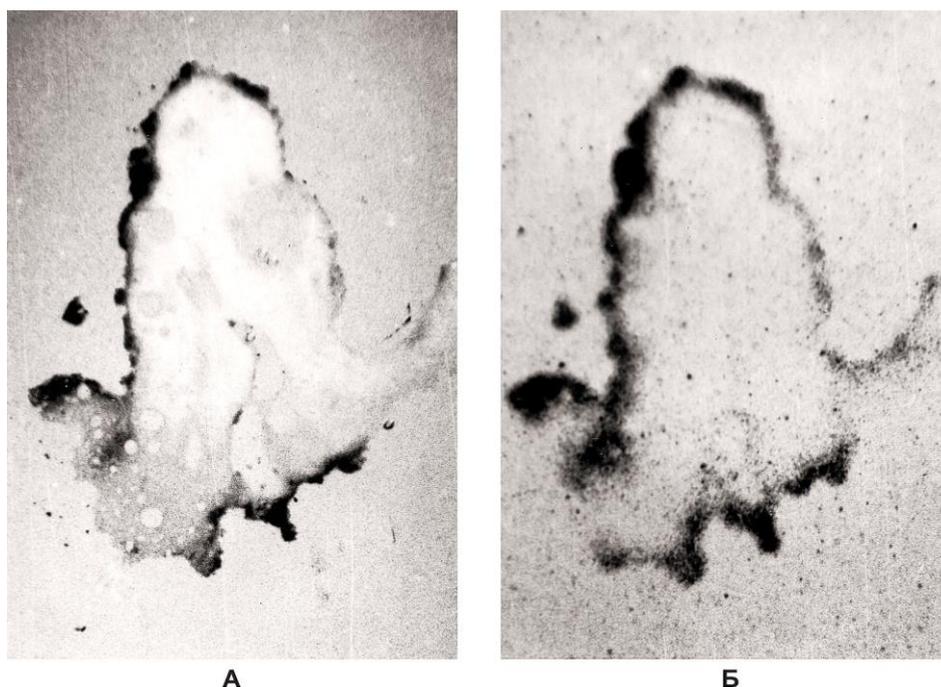


Рис. 45. Краевое обогащение силикатного шлака альфа-излучателями. А – фотография среза образца, Б – его трековая радиография (увелич. 60 раз).

Таблица 20. Химическая и радиохимическая характеристика трех типов новообразований из технологической пробы, полученной установкой «Эрлифт». Содержание химических компонентов (вариации) в %, радионуклидов – мКи/г на момент образования.

Компоненты	Гранулы	Шлаки	Класс < 0,1 мм
SiO ₂	32,2 – 38,1	31,6 – 36,6	18,7 – 24,5
MgO	32,9 – 36,5	19,6 – 29,8	24,5 – 30,1
CaO	8,4 – 9,5	12,1 – 12,7	13,3 – 15,1
Fe ₂ O ₃	7,6 – 8,9	11,4 – 23,5	24,2 – 26,8
Σ R ₂ O ₃	14,6 – 16,1	13,4 – 30,4	28,7 – 30,8
²³⁹ Pu	0,012	0,014	0,01
¹⁴⁴ Ce	1,1	1,0	0,9
¹⁵⁵ Eu	3,5 · 10 ⁻³	4,12 · 10 ⁻³	-
¹⁰⁶ Ru	0,009	0,043	0,30
¹³⁷ Cs	1,5 · 10 ⁻⁵	2,8 · 10 ⁻⁵	-
⁶⁰ Co	4,0 · 10 ⁻³	6,0 · 10 ⁻³	8,0 · 10 ⁻³

По своему химическому составу и составу радионуклидов три типа продуктов взрыва А-I довольно близки. Исходя из полученных данных, можно сделать заключение лишь об общих тенденциях изменения составов в рассматриваемой группе: гранулы – шлаки – мелкодисперсный класс. Наибольшие различия наблюдаются для крайних продуктов группы – гранул и мелкодисперсных железистых частиц, поскольку шлаки являются смешанными новообразованиями. По сравнению с гранулами мелкодисперсные частицы, естественно, обогащены железом. Одновременно увеличиваются содержания осколочного ^{106}Ru и наведенного ^{60}Co . При этом следует учитывать возможность обогащения рутением за счет его сорбции на мелкодисперсных частицах. Аналогичный вторичный сорбционный захват может быть и для ^{137}Cs , который присутствует во внутренней зоне полости, в основном, в виде хлорида.

Вся совокупность силикатно-железистых шлаковых новообразований взрыва представляет характерную парагенетическую ассоциацию минералов, элементов и радионуклидов, резко отличающуюся от основного продукта – переплавленной каменной соли.

Различие структуры и состава радиоактивных новообразований внутренней зоны полости взрыва А-I обусловлено дифференциацией её различных фаз и компонентов еще до консолидации солевого расплава. Сверху вниз происходило гравитационное осаждение твердых частиц высокотемпературных силикатно-железистых минералов. Снизу вверх происходила дегазация жидкого солевого расплава. Основным источником газов явился примесный доломит. Наличие протекающих одновременно двух противоположных по направлению миграционных потоков послужило основным механизмом образования различных структурно-минералогических разновидностей эксплозитов внутренней зоны.

Наиболее характерным является формирование придонной части солевого расплава, в которой в результате ликвационно-гравитационного обогащения сконцентрировалось основное количество радиоизотопов тугоплавких элементов и остатки делящегося вещества. Эти радионуклиды фактически были выведены из вышележащего солевого расплава (~ 1000 т) и сконцентрированы в узкой полосе придонной части полости в составе силикатно-железистых шлаков, гранул и мелкодисперсных железистых частиц (~ 6 т).

Краевая зона полости.

Участок краевой зоны боковой части полости был вскрыт наклонно-горизонтальной скважиной № 1056 на глубине 173,0-173,5 м (рис.36). На участках экзоконтакта практически неизменная каменная соль штока Чапчачи резко переходит в узкую зону (~ 1 см) перекристаллизованной соли со столбчатой структурой, в которой прямоугольные кристаллы галита закономерно располагаются вдоль термического контакта (рис.46). Аналогичная зона со столбчатой структурой галита показана на рис. 39.

Перекристаллизованный галит экзоконтакта сменяется такой же по размерам зоной черной соли. Её окраска связана с присутствием мелкодисперсных железистых шлаковых частиц. Прослой черной соли содержит ^{95}Zr , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{141,144}\text{Ce}$, ^{60}Co и ^{239}Pu .

Далее черная соль переходит в светлую переплавленную соль с первоначальной желтой окраской. По сравнению с гранулированным шлаком зона контак-

та обогащена ^{106}Ru и ^{141}Ce . В первом случае – летучим элементом, во втором – радионуклидом, имеющим газообразного предшественника ^{141}Xe ($T_{1/2}=1,7$ с).

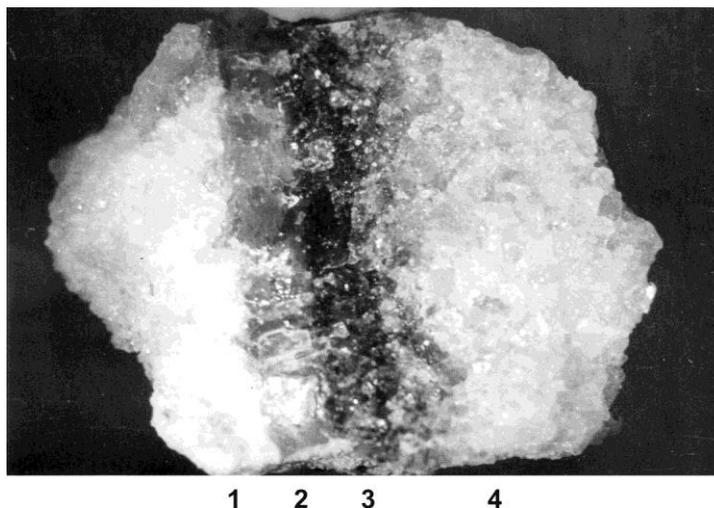


Рис. 46. Образец краевой зоны полости взрыва А-І. Скважина № 1056.
Натур. величина.

1 – малоизмененный галит экзоконтакта; 2 – перекристаллизованный галит; 3 – черная соль с включениями железистых минералов; 4 – переплавленная соль эндоконтакта.

Ореольная радиоактивная зона.

Ореольная радиоактивная зона разбуривалась шестью вертикальными скважинами с непрерывным отбором кернa, радиометрическими измерениями, структурно-минералогическими исследованиями, выделением представительных проб для детальных исследований. Наличие зоны радиоактивного загрязнения пород началось на глубине 74-75 м, т.е. на расстоянии ~ 6 радиусов полости, выше её кровли. Отдельные трещины, как это отмечалось ранее, распространились значительно дальше от полости, вплоть до выхода на поверхность соляного штока (рис. 33).

После взрыва по наблюдательным скважинам зафиксировано выделение метана, хлора, водорода, пропана, бутана, ^{85}Kr , $^{133,135,137,138}\text{Xe}$, $^{131,133}\text{I}$, ^{132}Te . Всего в атмосферу из полости вышло не более 1% образовавшихся при взрыве радиоактивных благородных газов.

Образование трещин происходило, в основном, по первичной слоистости солевой породы, почти вертикально или под углом $70-80^\circ$. Трещины взрывного происхождения в ореольной зоне фиксировались визуально по синей окраске галита, по радиометрическим измерениям кернa и последующими определениями радионуклидного состава. Характер радиоактивного загрязнения пород крайне неравномерный. Максимальные концентрации радионуклидов наблюдаются на стенках крупных трещин и в зонах интенсивной трещиноватости по глинисто-карбонатным прослоям в каменной соли. На участках развития плотных сравнительно однородных галитовых пород содержание радионуклидов резко сокращается вплоть до их полного отсутствия. Неоднородность четко выделяется по пятнистой окраске породы.

В момент взрыва по трещинам происходит инъекция в ореольную зону значительной части образовавшихся газообразных продуктов деления, в основном изотопов криптона и ксенона. При этом периоды полураспада радиоактивных бла-

городных газов определяют максимальные размеры ореольной зоны и её внутреннюю зональность (рис.34).

На самые большие расстояния от полости распространяются ^{137}Xe ($T_{1/2}=3,8$ мин) и ^{89}Kr ($T_{1/2}=3,2$ мин), которые после своего распада оставляют на стенках трещин ^{137}Cs ($T_{1/2}=30,0$ лет) и ^{89}Sr ($T_{1/2}=50,5$ сут). Это радионуклиды внешней части ореольной зоны полости.

Ближе к полости распространились благородные газы с меньшими периодами полураспада – ^{90}Kr ($T_{1/2}=32,3$ с) и ^{91}Kr ($T_{1/2}=8,6$ с), перешедшие после своего распада в ^{90}Sr ($T_{1/2}=29,1$ лет) и ^{91}Y ($T_{1/2}=58,5$ сут). Это радионуклиды внутренней, ближней части ореольной зоны полости.

В дальнейшем по мере распада ^{89}Sr и ^{91}Y во внешней части ореольной зоны остается ^{137}Cs , а во внутренней – ^{90}Sr . Условия нахождения этих долгоживущих радионуклидов на стенках трещин и гидрогеологический режим эпицентрального участка взрыва будут определять возможности их миграции.

При оценках скорости инъекции благородных газов по трещинам в соляном штоке возникают определенные трудности, в первую очередь, связанные с изменением сечения и формы трещин в пространстве. Можно, однако, сделать заключение, что в условиях соляного штока Чапчачи протяженность взрывного внедрения радиоактивных благородных газов с периодами полураспада 3,2 – 3,8 мин максимально превысила аналогичную величину для благородных газов с периодами полураспада 8,6 – 32,3 с на 35-40 метров.

На небольшие расстояния (~ 20 м) от кровли полости в ореольную зону по раскрывшимся трещинам проникла ^{125}Sb ($T_{1/2}=2,77$ года). Температура плавления сурьмы $630,5^\circ\text{C}$. Она активно участвует в сравнительно низкотемпературных вулканических процессах, мигрируя в форме различных химических соединений, в том числе и оксихлоридных [110].

Часть ореольной зоны в кровле полости частично обрушилась вниз на донную линзу переплавленной соли. К моменту обрушения расплав затвердел, и обломки навала не смешались с расплавом, как это произошло при взрыве «Гном» [79]. При этом взрыве, проведенном в массиве каменной соли с горизонтально расположенной слоистой текстурой, образовалась крупнообломочная взрывная брекчия. Масса обрушенной породы превышала массу расплавленной породы в 10-12 раз. При взрыве А-І в соляных породах с вертикальным расположением слоистости аналогичное превышение составляет 5. При массе расплава 1000 т, масса навала составляет ~ 5000 т. В однородных и текстурно-изотропных соляных массивах масса обрушенной кровли незначительна [84].

В процессе заполнения полости подземными водами ореольная радиоактивная зона была «промыта» и часть ^{90}Sr и ^{137}Cs перешла в полостной раствор. Распределение этих радионуклидов при взрыве А-І приведено в таблице 21 .

В ореольной зоне, после «промывки» находится почти половина от образовавшихся ^{90}Sr и ^{137}Cs . В линзе переплавленного галита находится «недостающая» половина ^{90}Sr , но только 21% от всего образовавшегося ^{137}Cs . В полостной солевой раствор (рапу) перешло 36% от образовавшегося ^{137}Cs . и лишь 3% ^{90}Sr .

Содержание трития в полостном рассоле по данным опробования 1975 года составляет $10,7 \cdot 10^4$ Бк/л.

Полостной раствор, объемом ~ 10 000 м³ относится ко вторичным образованиям – жидким радиоактивным отходам подземных ядерных взрывов. Плотность полостного раствора - 1,20 г/см³, минерализация – 330 г/л. рН – 6,6-7,5.

Таблица 21. Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr при взрыве А-I (активность на момент образования)

Зона, продукты взрыва, их количество	Радионуклид	Удельная активность, Бк/кг, Бк/л	Суммарная активность, 10^{12} Бк	Доля от образовавшегося, %
Внутренняя зона, переплавленная соль, ~ 1000 т	Цезий-137	$1,4 \cdot 10^6$	1,4	21
	Стронций-90	$2,5 \cdot 10^6$	2,5	47
Ореольная радиоактивная зона	Цезий-137		2,9	43
	Стронций-90		2,6	50
Внутриполостной раствор NaCl, ~ 10 000 м ³	Цезий-137	$2,4 \cdot 10^5$	2,4	36
	Стронций-90	$1,8 \cdot 10^4$	0,2	3

Через четыре года после взрыва А-I было установлено, что в полости происходит образование соли самосадки – кубических кристаллов галита размером до 7 мм, которые накапливаются на поверхности навала. По данным автордиографий радиоактивные стронций и цезий в кристаллах самосадки присутствуют лишь в жидких микровключениях, но не входят в структуру галита. В природных условиях примеси в кристаллической структуре хлористого натрия большей частью механические, в основном газовой-жидкие включения, а также включения глинистых или карбонатно-сульфатных минералов. Замещению в кристаллической структуре галита натрия стронцием или цезием препятствует различие размеров их ионных радиусов – $\text{Na}^+ = 0,98 \text{ \AA}$, $\text{Sr}^{2+} = 1,20 \text{ \AA}$ и $\text{Cs}^+ = 1,65 \text{ \AA}$.

5.2. Взрывы в солях с примесью ангидрита А-II, А-III, А-IV

Взрыв А-I был единственным, проведенным в солях с глинисто-карбонатными примесями. Все остальные взрывы на солянокупольной структуре Большой Азгир проведены в каменной соли с примесью сульфата кальция – ангидрита.

Взрыв А-II проведен в верхней части соляного купола Западный Азгир на глубине 600 м. Геологический разрез участка взрыва приведен на рис. 47 и табл. 22.

Водоносные горизонты пород, перекрывающих соляной купол, приурочены к песчаным прослоям в отложениях апшеронского яруса и к трещиноватым и брекчированным гипсовым породам кунгурского яруса перми.

На участке проведения взрыва А-II наблюдается четко выраженная гравитационная зональность подземных вод – чем глубже водоносный горизонт, тем выше минерализация, а следовательно, плотность и вязкость хлоридно-натриевых растворов (табл. 23).

Каменная соль в кровле купола полосчатая с прослоями, обогащенными ангидритом. Галит крупнокристаллический с величиной монокристаллов до 6-10 мм. Основной примесный минерал – ангидрит, содержание которого варьирует для отдельных проб от 0,7 до 8,3 % масс. На глубине 600 м среднее содержание ангидрита 3,8% масс. Ангидрит образует в каменной соли складчатые прослои толщиной 1-5 мм, гнезда и линзы до 1-2 см. Падение слоистости на восток под углом 20-30°.

В водонерастворимом остатке 97-99% масс. составляет ангидрит. Остальная часть (1-3 % масс.) представлена смесью монтмориллонита, доломита, кварца и органического вещества.

До проведения взрыва А-II вблизи технологической скважины были пробурены три наблюдательные гидрогеологические скважины (рис. 47), оснащенные

измерительной аппаратурой, позволяющей следить за водно-газовым режимом эпицентральной зоны взрыва. После взрыва (01.07.1968 г.) на поверхности грунта в радиусе ~ 1 км от скважины А-II образовалась серия неглубоких (до 0,6 м) откольных трещин, из которых после уплотнения приповерхностных пород волной сжатия в течение 2-3 часов происходило интенсивное выделение подпочвенных вод.

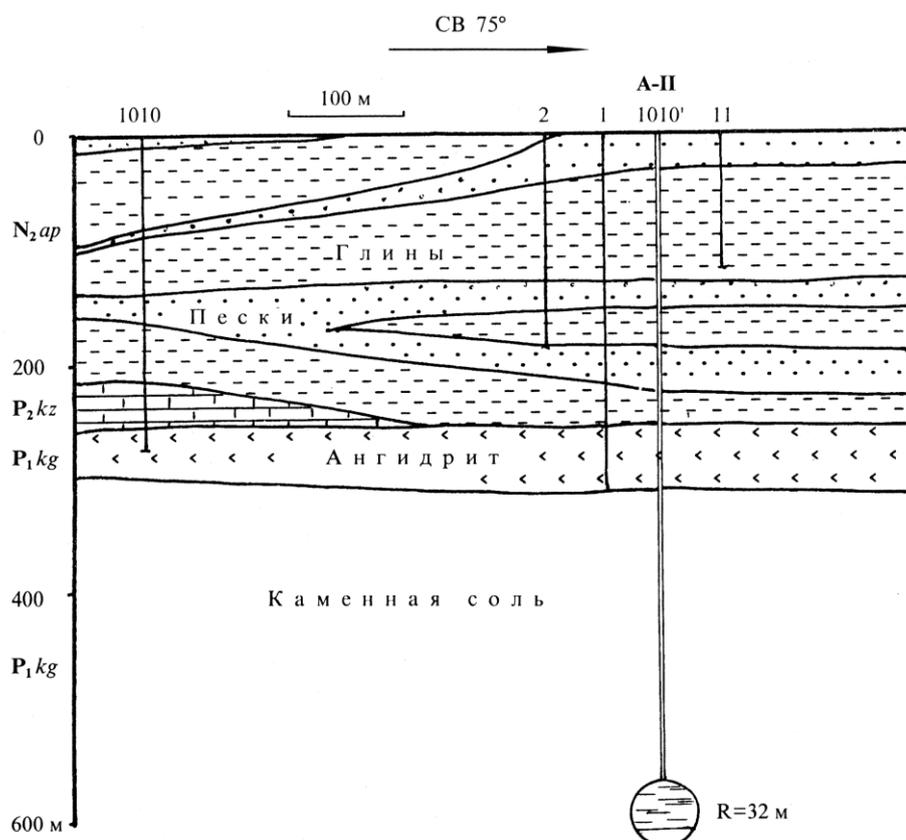


Рис. 47. Геологический разрез сводовой части соляного купола Западный Азгир на участке проведения взрыва А-II. 1010 – номера скважин.

Таблица 22. Стратиграфический разрез участка взрыва А-II по данным скважины 1010' (см. рис. 47)

Интервал, м	Возраст и характер пород
0 – 1,5	Современные пески и суглинки <i>Верхний неоген, апшеронский ярус</i>
1,5 – 28,0	Пески мелкозернистые, серые, зеленоватые, бурые
28,0 – 116,0	Глины неяснослоистые, серые, зеленоватые
116,0 – 138,0	Пески мелкозернистые, кварцевые, зеленовато-серые
138,0 – 182,0	Глины слюдистые, серые
182,0 – 211,0	Пески мелкозернистые, зеленовато-серые
211,0 – 218,5	Глины голубоватые, темно-серые
218,5 – 221,0	Глины песчанистые, серые
221,0 – 239,5	Глины бурые с линзами песков <i>Нижняя пермь, кунгурский ярус</i>
239,5 – 281,7	Гипсы трещиноватые, брекчированные
281,7 – 296,0	Ангидрит, плотный тонкослоистый
296,0 – 600,0	Каменная соль крупнокристаллическая с ангидритом

Таблица 23. Химический состав надсолевых вод на участке проведения взрыва А-II (г/л).

Компоненты	N _{2ap}		P _{1kg}
	До 28,0 м	200-211 м	281,7 м
Na ⁺ + K ⁺	8,87	13,76	73,48
Mg ²⁺	1,20	1,06	0,17
Ca ²⁺	0,19	0,76	2,32
Cl ⁻	15,56	25,09	113,96
SO ₄ ²⁻	1,06	0,38	5,05
HCO ₃ ⁻	0,049	0,45	0,024
Сухой остаток	28,44	43,65	197,96

Уплотнение более глубоких водоносных горизонтов вызвало излив, а затем фонтанирование подземных вод из скважин №№ 2, 11. Водоизлияние продолжалось более 24 часов. Давление на оголовке скважины № 2 через 12 часов достигало $2,1 \cdot 10^5$ Па. Радиоактивное загрязнение на скважинах не установлено.

На наиболее глубокой скважине № 1 после взрыва наблюдался уход подземных вод и всасывание воздуха. Через 6 часов после взрыва всасывание сменилось выделением газов, в составе которых присутствовали радиоактивные благородные газы ксенон и криптон. По аналогии со взрывом А-I можно было предполагать, что газовыделение связано с проникновением в полость подземных вод из наиболее глубокого кунгурского горизонта. Не исключено, что по нарушениям герметизации обсадной колонны технологической скважины произошла связь полости с водоносным горизонтом неогеновых песков (182-211 м). Через 165 часов после остывания полости А-II на скважине № 1 происходит повторное разрежение и всасывание воздуха, означающее заполнение остывающей полости водой. Выдавливание полостных газов массой воды создает незначительное повышение давления и уровней радиоактивности на оголовке скважины № 1 через 195 часов после взрыва.

Полость А-II, как и полость А-I, после взрыва заполняется подземными водами. После взрыва А-II, как и после взрыва А-I, происходит поэтапное заполнение полостей подземными водами с двумя характерными всплесками выделения радиоактивных благородных газов.

Рассол в полости А-II представляет насыщенный раствор по отношению к хлориду натрия (галит) и сульфату кальция (ангидрит) (табл. 24).

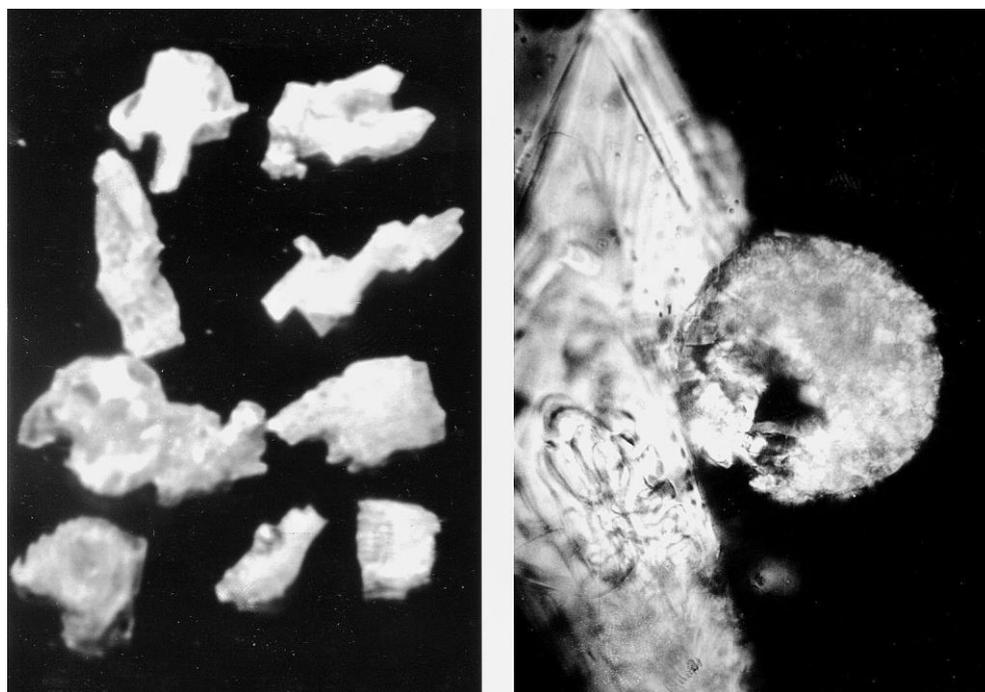
Плотность полостного рассола 1,20. Основными радионуклидами являются ⁹⁰Sr ($4,4 \cdot 10^4$ Бк/л) и ¹³⁷Cs ($4,8 \cdot 10^5$ Бк/л). Оба радионуклида равномерно распределены по глубине в интервале 560-600 м. Стронций присутствует, в основном, в ионно-молекулярной форме (95%), и только 5% связаны с мелкодисперсными частицами. Основная часть цезия присутствует в молекулярной форме.

Отбор твердых проб из донной части полости А-II проводился дважды – через 4 месяца и через три года после взрыва. Пробоотбор был затруднен по техническим причинам. Возникали проблемы закрепления бурового инструмента в 50-метровом «пустом» пролете водозаполненной полости. Первая пробоотборная скважина смогла извлечь лишь обломочный материал в интервале 615-624 м. Отбор производился шламовой трубой. Второй скважиной был извлечен керновый

материал, в том числе керны переплавленной соли внутренней зоны полости в интервале 609-610 м. Обе скважины пробоотбора разбуривались в 5-7 метрах от технологической скважины А-П.

Таблица 24. Химический состав рассола из полости взрыва А-П. Глубина отбора пробы – 585 м.

Компоненты	Содержание, г/л
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	118,5
Ca^{2+}	2,1
Mg^{2+}	1,28
NH_4^+	0,0015
Fe^{3+}	0,0015
Cl^-	188,9
SO_4^{2-}	1,98
HCO_3^-	0,183
Сухой остаток	312,9



А

Б

Рис. 48. А – «решетчатый» ангидрит, выделенный после растворения из «эвтектического» расплава, увелич. 20 раз; Б – гранула силикатного минерала на кристалле ангидрита, увелич. 350 раз.

Переплавленная соль представляет среднезернистую породу с размерами кристаллов галита 0,5-1,0 мм с зеленовато-серой пятнистой окраской (не ярко-оранжевой, как при взрыве А-П). В ней встречаются газовые каверны неправильной формы размером до 2-3 см. Обнаружены участки застывшей ангидрит-галитовой эвтектики, на которых галит имеет округлую эллипсоидную форму, а ангидрит представлен разнообразными «фигурными» деформированными выделениями (рис. 48 А). В шлифах ангидрит-галитовая порода имеет характерную решетчатую текстуру, аналогичную образцам взрыва «Сэлмон» (рис. 28).

На момент пробоотбора (июль 1971 г.) в средней пробе переплавленной соли взрыва А-II присутствовали следующие радионуклиды (Бк/г): $^{144}\text{Ce} - 1,1 \cdot 10^5$; $^{106}\text{Ru} - 2,4 \cdot 10^3$; $^{137}\text{Cs} - 1,5 \cdot 10^3$; $^{60}\text{Co} - 0,83 \cdot 10^3$.

Наряду с унаследованными минералами – галитом и ангидритом – в пробах были обнаружены новые, ранее в солях не присутствующие минералы. Как правило, они в виде микровключений находятся в ангидрите.

Минералы группы оливина образуют агрегаты неправильной формы с размерами 3-10 мкм или микрогранулы (рис. 48 Б). Встречаются зерна кварца, покрытые пленками ортосиликатов.

Минералы группы магнетита представлены кристаллами кубической формы с размерами 3-7 мкм. Часто они ассоциируют с выделениями минералов группы оливина.

После пробоотбора в 1968 году были проанализированы две фракции водонерастворимого остатка переплавленной соли (табл. 25).

Таблица 25. Удельная активность двух фракций водонерастворимого остатка переплавленной соли из полости взрыва А-II, Бк/г на июль 1968 г.

Фракции	^{95}Zr	^{144}Ce	^{103}Ru	^{106}Ru	^{90}Sr
Ангидритовая	$2,3 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^4$
Силикатная	$2,2 \cdot 10^6$	$2,3 \cdot 10^6$	$7,0 \cdot 10^7$	–	–

Как показали дальнейшие исследования проб, отобранных в 1971 г. (табл. 26), среди продуктов взрыва А-II нет четкого обособления радионуклидов – изотопов тугоплавких элементов с определенной минеральной группой, пространственно выделяющейся в линзе переплавленной соли, как при взрыве А-I. В то же время α -излучающие изотопы сконцентрированы в мелкодисперсном оливине, который накапливаются в остаточном расплаве ангидрит-галитовой эвтектики. Отдельные участки с характерной структурой эвтектики (см. рис. 28) распределены по всему объему переплавленной каменной соли. Если при взрыве А-I произошла концентрация группы радионуклидов в гранулированных шлаках локальной придонной линзы, то при взрыве А-II такого выделения и обогащения не выявлено.

Таблица 26. Содержание радионуклидов в различных фракциях водонерастворимого остатка переплавленной соли из внутренней зоны полости А-II (Бк/г на сентябрь 1971 г.)

Минералы, фракции	$\Sigma\alpha$ -активность	^{144}Ce	^{125}Sb	^{60}Co
«Фигурный» ангидрит	$1,0 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^4$	–	–
Силикатные пленки	$1,2 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$
Магнитная фракция	$1,4 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^4$	$5,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^5$
Фракция оливина	$1,5 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^5$	$5,2 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^4$

Зона трещиноватости за границами нижней части полости А-II распространилась в соляной массив максимально на 6 м. По данным радиометрического каротажа скважин на площадке взрыва А-II максимальное распространение ^{137}Cs по

трещинам надполостной ореольной зоны составило ~ 70 м, или 2,2 радиусов полости.

В дальнейшем, в 1975-1979 гг., в водозаполненной полости А-II было произведено шесть повторных взрывов малой мощности (табл.13). Мелкодисперсные частицы – продукты повторных взрывов оседали из соляного раствора и накапливались на дне полости на глубине 605-610 м. В ходе проведения повторных взрывов малой мощности в водозаполненной полости изучалось распределение актинидов в растворе хлористого натрия, способы их химического выделения. Отрабатывалась технология быстрого входа в полость и сокращение интервалов между взрывами. Наименьший «межвзрывной» интервал составил 16 суток [73].

Взрыв А-III был первым, проведенным в соляном куполе Восточный Азгир.

Восточный Азгир – полностью закрытый купол с расчлененным рельефом кровли солевых пород. Каменная соль купола средне- и крупнокристаллическая, от бесцветной до темно-серой. Присутствуют зоны перекристаллизации и дробления мощностью до 5-7 см. Основным примесным минералом является ангидрит, который присутствует в виде прослоев (1-3 мм) и небольших линз. Для пород купола характерны интенсивная дислокация, мелкая складчатость и дробление отдельных прослоев ангидрита. Углы падения прослоев непостоянные. Интенсивная деформация соляного массива отразилась, по-видимому, не только на его внутренней структуре, но и на рельефе всего купола (рис.30).

Водонерастворимый остаток солей Восточного Азгира на 97-99% представлен ангидритом, общее количество которого в зонах перекристаллизации составляет доли процента, а на полосчатых участках – до 9-10% масс. В интервале глубин образования полости А-III среднее содержание ангидрита ~ 1% масс., а взрыва А-IV – ~ 7% масс. В солях присутствуют незначительные количества (менее 0,1% масс.) глинистых минералов и карбонатов. Средний удельный вес породы по куполу – 2,20 г/см³, пористость – 2,3 %, влажность – 0,1%.

Каменная соль Восточного Азгира перекрыта гипсово-ангидритовым кепроком, мощностью от 11 до 51 м (рис. 49). Гипс, как правило, залегает выше ангидритовых пород или образует в них прослои и линзы.

На породах кунгурского яруса нижней перми P_1kg залегают верхнепермские известняки казанского яруса P_2kz . Карбонатные породы от мелко- до среднезернистых, местами с кавернозной текстурой. В известняках встречаются прослои глин и песчаников. Мощность казанских отложений по данным структурной скважины достигает 50 м.

В комплекс надсолевых пород входят нерасчлененные отложения пермского триаса $P_2 - T_1$, представленные переслаивающейся толщей пестроцветных глин, песков и песчаников. Их общая мощность от 50 до 100 м.

Палеозойские и мезозойские породы перекрыты толщей неогеновых (апшеронских) глин N_2ap . Глины плотные с прослоями алевролитов. Их мощность составляет от 100 до 263 м. Неогеновые глинистые отложения развиты по всей площади купола Восточный Азгир, на отдельных участках они выходят на поверхность, но в большинстве случаев перекрыты современными маломощными эоловыми или лиманными осадками.

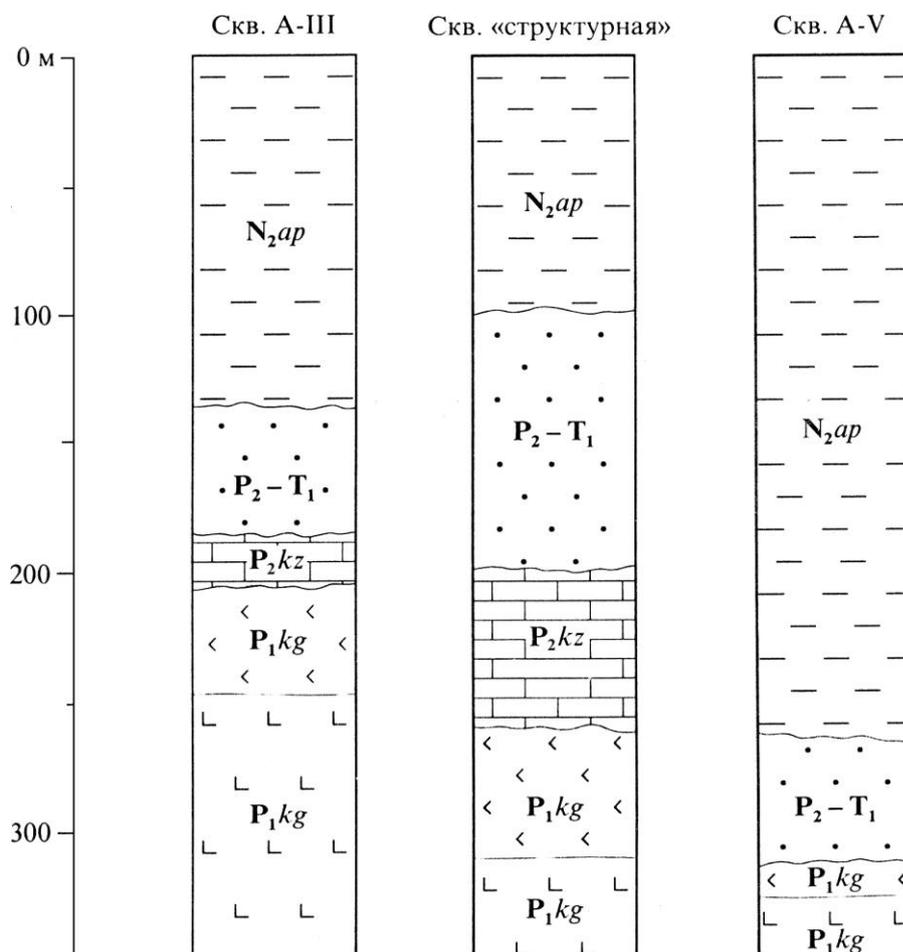


Рис. 49. Стратиграфические разрезы надсолевых пород купола Восточный Азгир по профилю скв. А-III – скв. «структурная» – скв. А-V (см. рис. 31).

При разбуривании скважин на куполе Восточный Азгир определился наиболее водообильный горизонт – пески и песчаники пермотриаса $P_2 - T_1$. По данным наблюдательных гидрогеологических скважин при понижении динамического уровня на 3,5-8,0 м. из этих пород был получен приток минерализованных хлоридно-натриевых вод от 10,8 до 21,6 м³/час. Динамический уровень пермотриасового горизонта составляет 30-70 м. При расходе 0,75-3,0 м³/час понижение уровня воды в скважине составило 20-30 м. Минерализация рассолов увеличивалась с глубиной пробоотбора и составляла 58,5 г/л в интервале глубин 170-215 м и 134 г/л в интервале 265-275 м.

Менее водообильными являются кавернозные известняки верхней перми P_2kz . При бурении скважин на площадке А-III проведена откачка этого горизонта в интервале 186-192 м. При расходе ~ 20 м³/час понижение уровня рассола в скважине составило 8 м. Минерализация хлоридно-натриевых рассолов достигает 286 г/л.

На глубине заложения заряда взрыва А-III (986 м) каменная соль имела характерные для всего купола следы тектонической деформации со складчато-разрывными прослоями примесного ангидрита, общее количество которого составляло 1-2% масс. Кроме ангидрита в солях присутствовали в незначительных количествах силикаты (не более 1% масс.), карбонаты (не более 0,1% масс.) и оксиды железа (0,0015 масс.). Крайне малое содержание в каменной соли элементов, образующих высокотемпературные минералы и шлаки, позволяло ожидать «рассеянно-

го» распределения радионуклидов – изотопов тугоплавких элементов по всему объему переплавленной соли, т.е. повторения взрыва А-II. Небольшая примесь газообразующих карбонатов давала основание для отсутствия повышенного давления в полости взрыва после ее охлаждения.

Взрыв А-III произведен 22 декабря 1971 г. Вскрытие полости произведено в июле 1974 г. К моменту вскрытия в полости существовало незначительное разрежение газовой смеси по сравнению с атмосферными условиями. После «засасывания» воздуха в полость начался ритмический газообмен, полость «дышала» с одинаковыми интервалами всасывания и выхода газов – 6-7 минут.

Кровля полости фиксировалась на глубине 943-945 м, а дно пустого пространства на глубине – 1011-1012 м. По данным лазерной локации радиус полости на глубине заложения заряда (986 м) составил 39 м. Основная задача эксперимента была выполнена. В солевом массиве на большой глубине создана сухая полость объемом более 200 000 м³.

Однако, в создавшихся условиях возникли трудности проведения проботбора из линзы переплавленной соли, поскольку существовал «пустой» полостной пролет протяженностью почти 70 м. В свободном пространстве колонна обсадных труб изгибается и ломается. Осложнен в таких условиях и пробоотбор небольшими «висящими» устройствами.

Наиболее эффективным оказался отбор проб шламоборником – трубой-стаканом, расположенной над турбобуром, в который сверху собираются обломки породы, разрушенной буровым инструментом. В полости А-III использовалась труба-шламоборник диаметром 0,6 м и длиной 4 м, в которую загружалось за один рейс 250-300 кг измельченной солевой породы. Для входа в полость использовалась технологическая скважина. По центральной части линзы переплавленной соли проведен пробоотбор в интервале 1012-1037 м. Общее количество отобранного материала составило более 2 000 кг.

В переплавленной соли присутствуют небольшие количества (< 0,1% масс.) новообразованных минералов:

- магнетит представлен прямоугольными кристаллами (3-7 мкм) и агрегатами неправильной формы размером до 1 мм;
- минералы группы оливина образуют округлые зерна размером 2-10 мкм;
- минералы группы шпинели представлены хорошо образованными ромбическими кристаллами размером 20-30 мкм, содержащими ранее выделившиеся микроромбические кристаллы магнетита.

Кроме них в незначительных количествах по данным рентгенофазового анализа присутствуют: вюстит (FeO), лепидокрокит (γ -FeOOH), периклаз (MgO), известь (CaO).

Из этой группы минералов для гамма-спектрометрического анализа удалось выделить лишь фракцию магнетита (табл. 27).

По разрезу донной части внутренней зоны полости выделены две характерные разновидности переплавленной соли:

- в интервале 1012-1023 м – светлосерая соль с равномернозернистой структурой и небольшими линзами закристаллизовавшейся ангидрит-галитовой эвтектики;
- в интервале 1023-1025 м – белая соль с петельчатой структурой, образованной округлыми, удлиненными зернами галита (до 2-3 мм), пространство между которыми заполнено «решетчатым» ангидритом (рис. 50).



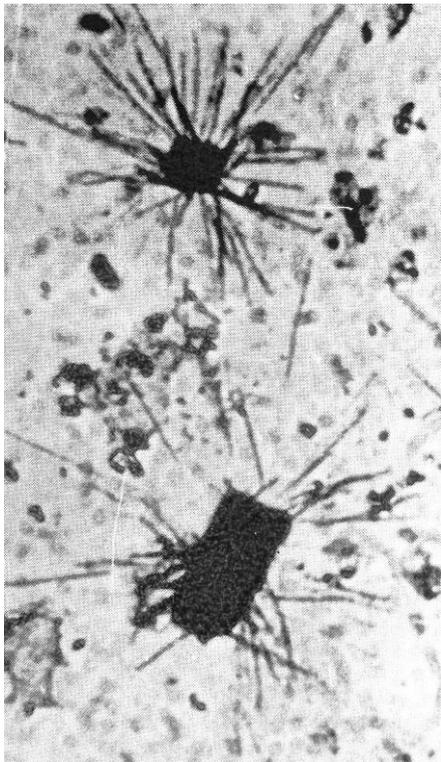
Рис.50. Ангидрит-галитовая порода с петельчатой структурой из нижней части донной линзы полости А-III. Увелич. 5 раз.

Таблица 27. Содержание основных гамма-излучающих радионуклидов в продуктах взрыва А-III (Бк/г на момент образования)

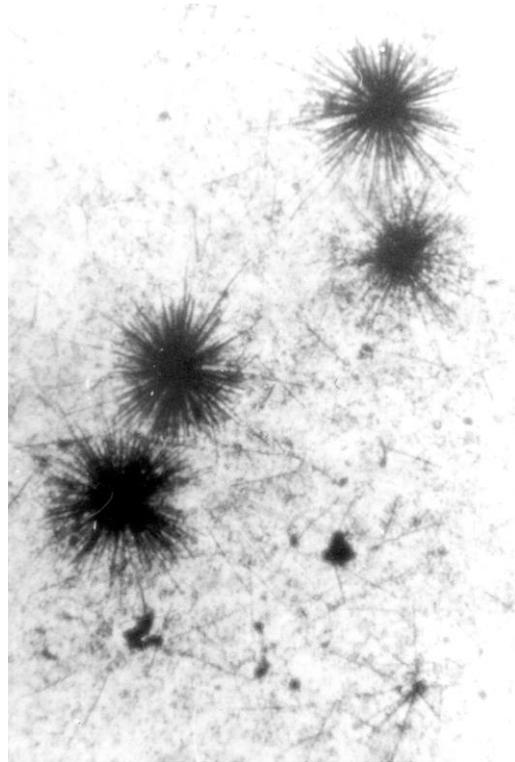
Порода, минерал	^{155}Eu	^{144}Ce	^{125}Sb	^{137}Cs	^{54}Mn	^{60}Co
Равномернозернистая соль	$5,5 \cdot 10^1$	$3,9 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^2$	$8,0 \cdot 10^2$	–	$6,3 \cdot 10^2$
Ангидрит-галитовая порода (рис. 44)	$2,0 \cdot 10^3$	$3,9 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	–	$4,2 \cdot 10^1$
Ангидрит из этой же породы	$2,7 \cdot 10^4$	$5,6 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^5$	$7,3 \cdot 10^3$	–	$2,4 \cdot 10^3$
Ангидрит прозрачный без включений	$1,7 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^2$	–	$4,7 \cdot 10^2$
Ангидрит насыщенный включениями	$2,4 \cdot 10^4$	$8,4 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^4$	$5,2 \cdot 10^5$
Фракция магнетита из ангидрита		$3,8 \cdot 10^7$	$2,4 \cdot 10^5$	$8,9 \cdot 10^3$	$3,9 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^7$

Повышенные содержания радионуклидов характерны для фракции магнетита, а в основных продуктах взрыва, галите и ангидрите, радионуклиды связаны с микровключениями, в том числе и минералов группы магнетита. К этим же минералам приурочены альфа-излучающие радионуклиды (рис. 51). Кроме того, во фракции магнетита присутствуют непрозрачные микрочастицы (3-5 мкм) с высоким содержанием ^{239}Pu .

Основной целью взрыва А-III была проверка возможность получения ^{231}Pa и ^{233}U . Ядерно-взрывная наработка целевых изотопов была осуществлена – «создано единственное на Земле искусственное месторождение протактиния» [75]. Однако с горно-геологических позиций распыление целевого изотопа по всей массе переплавленной соли (~ 60 тыс. т) не позволяет считать задачу создания искусственного месторождения полностью решенной.



А



Б

Рис. 51. Микрочастицы магнитной фракции, содержащие плутоний. Препарат с использованием толстослойной ядерной эмульсии.

А – прямоугольные кристаллы магнетита. Б – непрозрачные микрочастицы (5-7 мкм).
 Пробег α -частиц ^{239}Pu в используемой ядерной эмульсии равен 22 мкм.

При взрывах А-II и А-III в солях с примесью ангидрита и дефицитом тугоплавких оксидов не произошло обособление локальной «рудной» зоны, как это наблюдалось, например, при взрыве А-I. Не были созданы условия образования искусственного месторождения, удовлетворяющего горно-геологическим требованиям.

Ко времени проведения взрыва А-III на площадке А-I была смонтирована и опробована экспериментальная установка «Эрлифт» (рис. 52), предназначенная для разработки и подъема на поверхность материала из донной линзы переплавленной соли [89, 101]. Транспортирующей средой являлся солевой раствор полости, который после отделения твердой фазы (шлама и обломков соли) возвращался обратно в полость. Поднимаемая на поверхность пульпа проходила радиометрическую сортировку, для выделения из нее твердого материала, содержащего силикатно-железистые шлаки и гранулы. Выделение полезного компонента производилось по суммарной гамма-активности, а затем по «реперному» для гранул и шлаков гамма-излучателя – ^{144}Ce (максимальная энергия гамма-квантов 0,409 МэВ) позднее – по ^{60}Co (максимальная энергия гамма-квантов 2,158 МэВ).

Установкой «Эрлифт» извлечено на поверхность более 2 т переплавленной каменной соли из донной линзы полости. Накоплено около 200 кг кондиционного по изотопно-радиометрическим параметрам искусственного рудного концентрата. Из накопленного материала на специальной установке получен водонерастворимый остаток силикатно-железистых шлаков и гранул. Одновременно был опробован безводный вариант концентрирования шлаковых частиц методом плавления, а

также возможность обогащение концентрата магнитной сепарацией. На площадке А-1 на экспериментальной установке проведено кислотное вскрытие и выделение модельного радионуклида ^{239}Pu экстракционно-сорбционными методами. В результате из продуктов взрыва А-1 было выделено 70 мг ^{239}Pu (неразделившаяся часть заряда) [101].

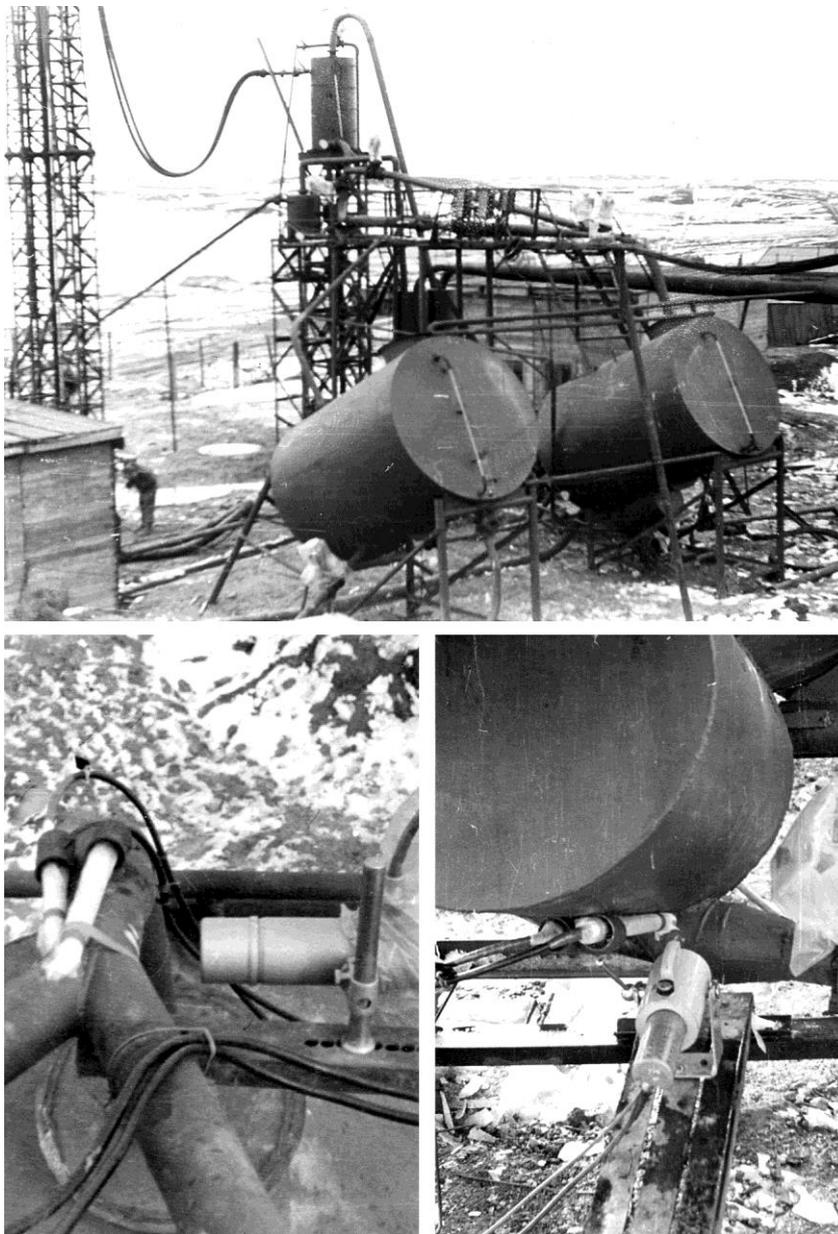


Рис. 52. Верхняя фотография – общий вид экспериментальной добывающей установки «Эрлифт», смонтированной на площадке взрыва А-1 в 1970 г. На нижних фотографиях показано расположение датчиков радиометрического контроля и управления распределением твердой фазы поднимаемой пульпы.

Фактически к концу 1970 года была реализована программа создания опытно-промышленной установки для разработки и извлечения сырья искусственного месторождения и проведены все радиохимические операции по извлечению целевого изотопа [101]. Оставалась нерешенной задача создания ядерным взрывом искусственного месторождения с требуемыми свойствами.

Возможность управления процессами распределения радионуклидов при подземном взрыве в солях с целью создания методами ядерно-взрывной технологии искусственного месторождения изотопов определена после проведения взрыва А-IV – 29 июля 1976 года. Целью взрыва была проверка наработки плутония [73].

Скважина А-IV (рис. 30) была пробурена до глубины 1011 м и до отметки заложения взрывного устройства (997 м) заполнялась железорудным концентратом (ЖРК). Выше взрывного устройства скважина также была заполнена ЖРК до глубины 970 м. Концентрат состоял из мелкозернистой смеси магнетита (85%) и силикатных минералов (15%), что позволяло ожидать образование после взрыва силикатно-железистых шлаков, которые сконцентрируются в донной части линзы переплавленной соли. В этих шлаках должен находиться наработанный взрывом плутоний.

Пробоотбор продуктов взрыва А-IV производился в июне 1981 года. В ходе него были определены основные параметры полости: радиус 38 м, поверхность донной линзы переплавленной соли зафиксирована на глубине ~ 1016 м, общее количество переплавленной соли в донной линзе ~ 60 тыс. т.

Для извлечения проб переплавленной соли использовался шламоборник, длиной 4-6 м, в котором за одну проходку накапливалось до 80 кг обломочного материала. По результатам изучения всех рейсов в интервале 1021-1038 м определены структурно-минералогические особенности и распределение радионуклидов по вертикальному разрезу центральной части донной линзы переплавленной соли:

- 1016-1031 м - светло-серая и темно-серая крупнозернистая каменная соль с характерной пятнистой структурой, образованной присутствием многочисленных сферических газовых включений, заполненных кристаллами ангидрита;
- 1031-1034 м – светлая ангидрит-галитовая порода с характерной петельчатой структурой, ранее выявленной для взрыва А-III (рис. 44);
- 1034-1037 м – среднезернистая переплавленная каменная соль с участками темной, почти черной соли, обогащенной мелкодисперсными включениями магнетита, шлаковых частиц и сферических гранул;
- 1037-1038 – серый крупнокристаллический галит со структурой «кирпичной кладки», образованной закономерным распределением прямоугольных кристаллов светлого галита (3 x 5 мм), пространство между которыми заполнено прозрачным темным галитом (рис. 53).

В пробах интервала 1034-1038 м в переплавленной каменной соли присутствуют шлаковые частицы с повышенной радиоактивностью. Размеры таких частиц достигают 6 мм, окраска их серая, черная, зеленовато-серая. Текстура массивная или кавернозная. Встречаются шлаковые гранулы диаметром 0,3-1,2 мм (рис. 54).

Химический состав средней пробы шлаковых частиц – SiO_2 – 30,0 %, Fe_2O_3 – 30,3 %, CaO – 26,8 %, MgO – 10,1 %, Al_2O_3 – 1,8 %. Основными минералами шлаковых новообразований являются магнетит (Fe_2O_3), γ -модификация ларнита – бредигит (Ca_2SiO_4), геленит – ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$). Присутствует в небольших количествах (< 1%) магнезиально-алюминиевая шпинель (MgAl_2O_4). Содержания магнетита непостоянны и варьируют от 25 до 60%.

Наиболее высокие содержания гамма-излучающих радионуклидов наблюдаются для шлаковых частиц [100] (рис. 55). Установлено, что повышенные содержания радионуклидов в ангидрите связаны с присутствием микровключений.



Рис. 53. Термальная перекристаллизация каменной соли со структурой «кирпичной кладки» в зоне экзоконтакта полости А-IV. Увелич. 15 раз.

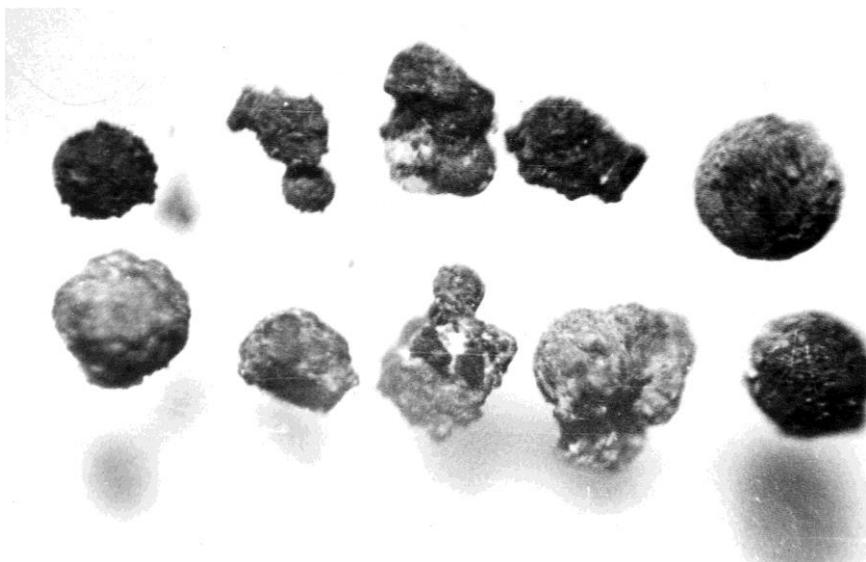


Рис. 54. Шлаковые гранулы из донной части линзы переплавленной соли полости взрыва А-IV. Увелич. 15 раз.

По данным автордиографических исследований основной альфа-излучающий радионуклид – ^{239}Pu сконцентрирован в шлаковых частицах, в которых он пространственно приурочен, как правило, к магнетиту. Однако связывать плутоний со структурой магнетита безосновательно, поскольку на автордиографиях рядом с выделениями магнетита присутствуют центры высокой концентрации ^{239}Pu (рис. 56). Известно, что корреляция между содержанием железа и содержанием плутония была установлена для продуктов взрыва «Гном». Но в то же время отмечалось, что эти радионуклиды, по-видимому, не ассоциируют с определенным минералом, а присутствуют в виде отдельных фаз, например, окислов [109].

Содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в средней пробе серого шлака составляет $1,5 \cdot 10^5$, в пробах галита, отобранных по всему интервалу донной линзы переплавленной соли эта же величина варьирует от 30 до 118 Бк/г.

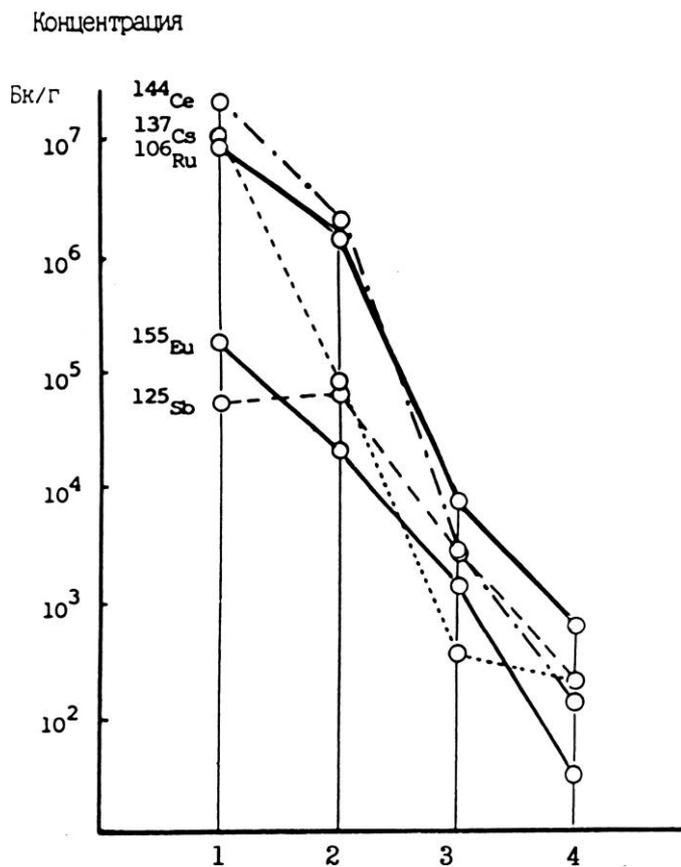


Рис. 55. Средние концентрации основных гамма-излучающих радионуклидов в переплавленном галите и примесных водонерастворимых новообразованных минералах взрыва А-IV [100]:
 1 – шлаковые частицы; 2 – фракция магнетита; 3 – новообразованный ангидрит; 4 – галит с минимальным количеством включений.

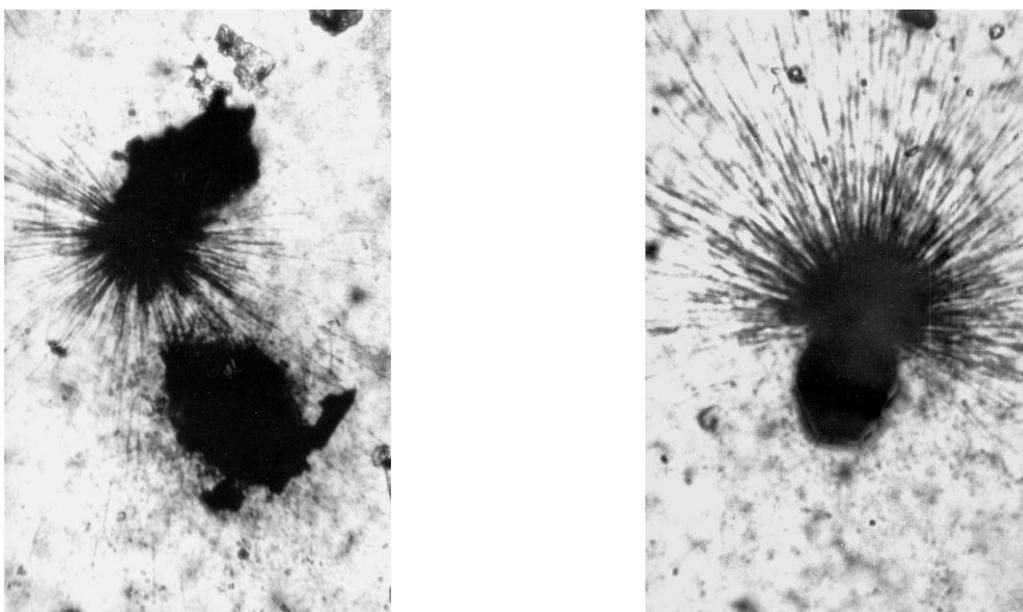


Рис. 56. Авторадиография фракции магнетита из черной соли интервала 1034-1037 м. С кристаллами магнетита ассоциируют микрочастицы, обогащенные ^{239}Pu .
 Длина α -треков ^{239}Pu равна 22 мкм.

Результаты проведенных исследований показали, что при взрыве А-IV введение в зону испарения и плавления пород железорудного концентрата позволило создать искусственное месторождение изотопов, «рудное тело» которого образовалось в узкой придонной зоне линзы переплавленной соли. При взрыве было наработано 15 кг плутония-239 [73]

Ударный метаморфизм подземного ядерного взрыва является сложным многоступенчатым процессом перераспределения и смены различных минеральных ассоциаций. При взрывах в каменной соли в числе твердых радиоактивных продуктов выделяется группа унаследованных минералов (галит, кальцит, ангидрит) с характерными структурами термального метаморфизма и новообразованные, собственно «взрывные» минералы, ранее не присутствующие, и не характерные для соляных пород – группа оливина, шпинели, магнетита. Их образование происходит в экстремальных условиях регрессивной фазы ударного метаморфизма. Специфические условия этой фазы, как и всего взрывного процесса, не всегда позволяют опираться на известные температурные оценки фазовых переходов. Кроме того, на искажение температурных границ влияет присутствие минерализаторов, таких как хлор, фтор и пр. [110].

Наряду со всеми осложнениями ударного метаморфизма, происходящие в его условиях высокотемпературные процессы минералообразования подчиняются основным кристаллохимическим закономерностям, выявленным для природных условий [98]. Установленные природные закономерности определили возможность радиогеохимического и структурно-минералогического управления взрывным процессом. Существующая экспериментально-теоретическая база, в свою очередь, дает широкие возможности развития ядерно-взрывных технологий.

Необходимо отметить, что возможность направленного распределения радионуклидов и продуктов взрыва в полостях, созданных в каменной соли, решает не только задачу создания искусственных месторождений изотопов. Выведение из общей массы переплавленной соли в локальную донную зону полости группы радионуклидов, в том числе и остатков делящихся изотопов, существенным образом снижает риск радиоактивного загрязнения хранящихся в полостях нефтепродуктов, газоконденсата и пр.

Вопросы создания крупных подземных емкостей с обеспечением безопасного хранения в них углеводородного сырья решались на площадке «Галит» при проведении последующих ядерных взрывов на Восточном куполе (табл. 13). Проведены, в частности, эксперименты по одновременному подрыву двух зарядов различной мощности, в условиях которых радиоактивной расплав соли стекает из полости большого объема в нижерасположенную полость, в которой был взорван заряд малой мощности.

Целью проведения взрыва А-V была оценка конвергенции (схождения) полости на глубине 1500 м. Полость заполнялась водой, и по ее изливу определялась скорость сокращения объема, которая для условий Восточного Азгира составила $\sim 0,2 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Взрыв А-IX произведен не в каменной соли, а в толще перекрывающих солевой купол неогеновых глин. Образовавшаяся при взрыве полость обрушилась, а на поверхности образовалась провальная воронка диаметром около 120 м и максимальной глубиной в центре до 20 м. Несколько повышенное по сравнению с глобальным уровнем содержание ^{137}Cs в водоеме площадки А-IX связано со смывом с большой поверхности водосбора радиоактивных осадков выпадений и последую-

щим испарением воды в летний период. Но в 1986 году объемная активность ^{90}Sr в 300 раз, а ^{137}Cs в 2500 раз была ниже предельно допустимых концентраций, что позволяло использовать воду водоема для хозяйственных нужд. Из-за высокой минерализации (до 20 г/л) для питья вода была непригодна [93].

На площадке «Галит» производилось стравливание газов из полостей, что приводило к выходу радионуклидов в окружающую среду – в атмосферу и частично на поверхность земли в пределах санитарно-защитных зон отдельных технологических площадок. Фактические данные по вопросам стравливания парогазовой смеси, а также обстановка и ликвидация последствий при взрывах с нештатной радиационной ситуацией (взрыв А-I, А-II-3, А-VIII) приведены в публикации большого коллектива сотрудников ряда министерств и ведомств Российской Федерации в 2001 году [87].

Специалисты Радиевого института им. В.Г. Хлопина совместно с сотрудниками ВНИИПромгаза разработали регламенты подготовки и последующей эксплуатации взрывных полостей-хранилищ. Постоянной поствзрывной операцией являлось вскрытие полостей после определенной «выдержки» по времени и управляемое стравливание в атмосферу полостной парогазовой смеси. Для обеспечения безопасности этого наиболее радиационно-опасного мероприятия были поставлены специальные научные исследования. Создана система отбора и анализа парогазовой смеси «в линию», непосредственно у оголовка технологической скважины. Анализы показали отсутствие в полостных газах кислорода, что являлось, кроме установленного геохимического факта, критерием представительного пробоотбора. Основными компонентами полостных газов Западного и Восточного куполов Большого Азгира являются CO_2 (88,0-98,2%) с примесями N_2 (до 10,2%), H_2 (до 4,3%), CH_4 (до 2,2%), CO (до 0,34%). Радиоактивные газы представлены изотопами криптона и ксенона [101].

За все время работ на площадке «Галит» постоянно проводились различные технологические операции, включая консервацию скважин и рекультивацию земель технологических площадок и прилегающих к ним территорий. После завершения всех научно-экспериментальных программ на площадке «Галит» в 1985 году проведено захоронение радиоактивных отходов в полость взрыва А-Х на глубину ~ 1000 м [93].

Необходимость проведения комплексной рекультивации, помимо чисто радиэкологических требований, была связана с тем, что площадка «Галит» в 1991 году оказалась на территории суверенного государства Республики Казахстан, и земли, отведенные ранее под экспериментальную площадку, предполагалось вернуть в сельскохозяйственный оборот совхоза «Балкудукский».

За радиационную безопасность площадки «Галит» отвечали два института – Радиевого института имени В.Г.Хлопина и ВНИИЭФ [75]. Начиная с 1965 г. на площадке и прилегающей к ней территории проводился регулярный контроль радиоактивного загрязнения окружающей среды [93]. Локальный контроль включал измерения содержаний радионуклидов в почвах, грунтах и растительности в пределах санитарно-защитных зон конкретных промплощадок. Территориальный контроль включал в сферу наблюдений почвы, растительность и источники водоснабжения в ближайших населенных пунктах, кошарах с населением 10-15 человек, и в крупных населенных пунктах на расстояниях до 70 км (г. Харабали), в число которых входили поселки Азгир, Батырбек, Балкудук, Суюндук и пр. Начиная с 1976 года проводились систематические обследования и отбор водных проб из скважин

на территории компенсационной мульды Ужантатор, включая самоизливающуюся скважину в её центральной части.

Усредненные по большому массиву исходных данных содержания радионуклидов в почвах, растениях и питьевой воде приведены в таблице 28. Усредненная суммарная радиоактивность объектов внешней среды за все время наблюдений оставалась на уровне 1965 г., т.е. до проведения взрывов.

Таблица 28. Усредненная суммарная активность объектов внешней среды в районе площадки «Галит» [93]

Год	Удельная активность		Объемная активность
	Почва, н·10 ⁻⁸ Ки/кг	Растительность, н·10 ⁻⁹ Ки/кг сырого веса	Вода источников водоснабжения, н·10 ⁻¹¹ Ки/л
1965	2,2	7,0	4,0
1966	2,3	8,5	3,5
1968	2,2	5,4	2,3
1970	2,0	6,7	2,5
1976	1,7	6,5	3,2
1978	1,8	6,5	1,6
1980	2,2	6,4	1,9
1983	2,2	5,3	1,4
1984	2,1	5,0	1,9
1986	1,9	140	3,0
1990	2,3	5,1	2,3

Используемые методики имели чувствительность определения радионуклидов с концентрацией порядка 0,1 значения допустимой концентрации для населения (ДК_Б) по существующим в то время нормативам НРБ-76/87. Для почв и растительности нет допустимых уровней, аналогичных ДК_Б, кроме значений, установленных на случай радиационных аварий. Для площадки «Галит» в качестве фоновой активности принимали ее значения, обусловленные присутствием в пробах природных радионуклидов и техногенных радионуклидов глобальных выпадений для данного региона [75].

По результатам длительных наблюдений установлено, что суммарная бета-активность проб растительности не превышает фонового регионального уровня 640 Бк/кг. Превышение фоновых значений было связано, как правило, не с высокими содержаниями ¹³⁷Cs, а с вариациями присутствующего природного радиоактивного изотопа ⁴⁰K.

Резкое возрастание радиоактивности проб растений в 1986 году произошло после аварии на Чернобыльской АЭС. В составе выпадений были идентифицированы ^{141,144}Ce, ¹⁰⁶Ru, ^{134,137}Cs, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb. В 1990 году уровни загрязнения растительности снизились до прежних значений.

Данные «внутреннего» радиоэкологического контроля неоднократно проверялись различными сторонними организациями. В 1991 году специалисты Гурьевского областного комитета по экологии и природопользованию провели обследо-

вание отдельных промплощадок и прилегающих к ним территорий с отбором проб грунта и растительности. Аналогичные контрольные измерения проводились ПГО Запказгеологии и Ленинградским государственным университетом по договору с СЭС Гурьевской области. Полученные результаты всех организаций совпадали с данными Радиевого института им. В.Г. Хлопина и ВНИИЭФ [75].

На территории совхоза «Балкудукский» уровень загрязнения ^{137}Cs в почвах за время наблюдений оставался ниже предельно допустимых концентраций. В растениях за пределами технологических площадок содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr находилось на уровнях фоновых значений. Среднее значение мощности экспозиционной дозы на обследуемой территории не превышало 16 мкР/час [75].

По совокупности полученных данных составлен паспорт площадки «Галит», в котором приведены ее радиоэкологическая характеристика, картограммы гамма-полей технологических площадок (рис. 57) и перечень рекультивационных мероприятий.

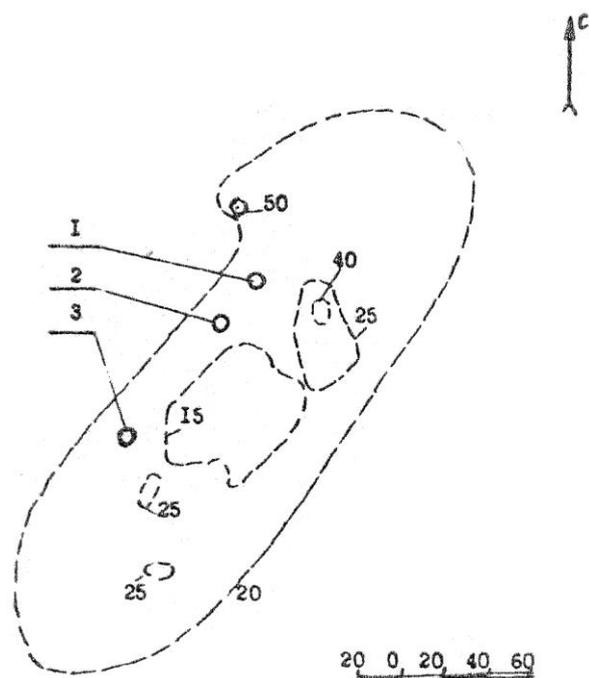


Рис. 57. Картограмма гамма-полей после рекультивационных работ на промплощадке А-IV (мкР/час), 1990 г. 1 – технологическая скважина, 2, 3 – наблюдательные скважины [93].

Установлено, что в процессе эксплуатации площадки «Галит» распространение техногенных радионуклидов за пределы отдельных техплощадок не происходило. Радиационная безопасность проживающего вблизи населения контролировалась и была полностью обеспечена.

При всех случаях выброса радионуклидов в атмосферу, максимально возможная индивидуальная доза внешнего и внутреннего облучения ограниченного контингента из населения за все время существования объекта не могла превысить 0,1 бэр. Это составляет около 2% от дозы, обусловленной естественным радиационным фоном за тот же промежуток времени (~ 5 бэр). Ограничения требовались на бурение глубоких скважин в непосредственной близости от полостей ядерных взрывов [73, 75, 87, 93].

5.3. Условия изоляции техногенных радионуклидов в солянокупольной структуре Большой Азгир

Подземные ядерные взрывы сопровождаются внедрением в геологическую среду большой группы техногенных радионуклидов – продуктов деления, остатков делящихся изотопов, нуклидов с наведенной активностью. После завершения программы работ на площадке «Галит» в солянокупольной структуре Большой Азгир остались значительные количества радиоактивных «отходов» ядерно-взрывных технологий. Программа мирного использования ядерных взрывов для народного хозяйства обращала особое внимание на вопросы радиационной безопасности, что подразумевало и надежную изоляцию техногенных радионуклидов в геологических формациях. Большой объем исследований условий локализации поствзрывных РАО в солянокупольной структуре Большой Азгир был проведен в Радиевом институте им. В.Г. Хлопина [24, 42, 52, 100, 111-113]. Публикации по этой тематике представляли не только узкий профессиональный интерес, но и привлекли внимание специалистов по обращению с радиоактивными отходами, поскольку ядерные взрывы в каменной соли можно было рассматривать в качестве крупномасштабных аналогов захоронения РАО в рекомендуемой МАГАТЭ геологической среде [114].

Результаты проведенных в Радиевом институте исследований обсуждались с отечественными и зарубежными специалистами:

- на Всесоюзном межведомственном совещании «Нетрадиционные пути использования галогенных формаций» (1990 г., г. Ивано-Франковск, Украина),
- на Международной конференции по обращению с высокоактивными отходами (1992, Лас Вегас, США),
- на семинаре по результатам натуральных исследований миграции радионуклидов «GEOTRAP» (1996, Кёльн, Германия),
- на Международной конференции по вопросам технологии и концепций удаления ВАО «DisTec'98» (1998, Гамбург, Германия),
- на совещании экспертов Минатома и Ядерного форума Японии (1998, Токио, Япония).

Начальная оценка безопасности изоляции радиоактивных продуктов подземных ядерных взрывов определяется соответствием геологических условий места их проведения с базовыми критериями МАГАТЭ для подземного захоронения РАО [115]. Необходимо отметить, что в процессе разработки базовых критериев в 1981-1983 гг. стали очевидны различия требований к рекомендуемым геологическим средам, в частности к соляным формациям [116].

Основные рекомендации МАГАТЭ должны выполняться для всего разнообразия геологических условий и радиоактивных отходов, в том числе для отходов ядерно-взрывных технологий, использующих в качестве вмещающей среды залежи каменной соли. Ниже приведен краткий анализ соответствия условий подземной изоляции техногенных отходов в солянокупольной структуре Большой Азгир с базовыми геологическими критериями.

① Первым требованием, предъявляемым к участку подземной изоляции РАО является достаточный объем выбранных горных пород, который может вместить подземные сооружения и буферную зону вокруг них. Для подземных ядерных взрывов требование критерия выполняется соблюдением полной камуфлетности. Работы на площадке «Галит» были ориентированы на крупную солянокуполь-

ную структуру с возможностью проведения взрывов в отдельном соляном штоке (А-I), соляном куполе (А-II) или серией взрывов в пределах крупного солянокупольного поднятия на расстояниях не менее 2-3 км друг от друга.

В результате проведения подземного ядерного взрыва, воздействия ударного метаморфизма с последующей инъекцией во вмещающие породы радионуклидов, образуется специфическая геотехнологическая структура, именуемая в публикациях центральной зоной взрыва. Для взрывов в каменной соли это полость взрыва, зоны трещиноватости вокруг полости, а также технологические и пробноотборные скважины.

Центральная зона подземного взрыва является участком недр, в котором полностью исключается какая-либо горно-техническая деятельность [93]. Аналогом такого выделения можно рассматривать горный отвод для особо охраняемых геологических объектов или для научных полигонов. В пределах горного отвода ликвидируются все скважины, а выделенная территория находится под радиоэкологическим контролем. Для площадки «Галит» эти положения корректируются законодательными постановлениями Правительства Республики Казахстан. В 1998 г. постановлением № 1176 Минсельхозу, акиму Атырауской области и Национальному ядерному центру Республики Казахстан было предписано определить границы вокруг территории бывшего объекта «Галит», на которой запрещается проведение геологоразведочных и буровых работ [87]. Основной целью выделения специального горного отвода является исключение возможности попадания радионуклидов в добываемое полезное ископаемое (например, каменную соль), или в сферу жизнедеятельности человека, при оптимальном размере горного отвода в недрах. Размеры специального горного отвода определяются для каждого объекта и зависят от структурно-геологических, минералого-геохимических и гидрогеологических условий на участке проведения взрыва. По предварительным данным по ряду объектов проведения подземных ядерных взрывов размеры линейных параметров горных отводов могут варьировать от 0,3 до 2-х и более километров [117].

В рамках первого критерия можно предварительно оценить объемы горных отводов для площадки взрыва А-I, площадки А-II и для территории купола Восточный Азгир, где была проведена серия взрывов. Параметры горных отводов будут определяться геологическими условиями участков, глубиной проведения взрыва, объемами полостей и протяженностью образовавшихся после взрывов зон трещиноватости (установленных или расчетных) [42, 84, 89, 100].

Для оценки условий подземной изоляции радиоактивных отходов ядерновзрывных технологий особого внимания требует обустройство технологической скважины и надежность ее консервации. При наличии природных барьеров технологические и пробноотборные скважины являются техногенными каналами, соединяющими полости с поверхностью. Для водозаполненных полостей эти каналы – потенциальные пути миграции радиоактивных полостных рассолов. Причиной выдавливания таких рассолов может стать конвергенция, уменьшение объема полостей вследствие развития реологических процессов. Для купола Восточный Азгир величина конвергенции на глубине 1500 м определена после проведения взрыва А-V. Уменьшение полости объемом $9\,500\text{ м}^3$ не превышает 73 м^3 в год (менее 0,01 части).

Для всех взрывов на площадке «Галит» надежность перекрытия потенциального техногенного канала миграции является обязательным условием локализации полостных радиоактивных рассолов.

На площадке А-I ограничения проведения геологоразведочных и буровых работ вводятся для всей апикальной части штока Чапчачи. Размеры горного отвода следует принять от глубины 200 м и до выхода каменной соли на поверхность. Радиус ограничительной зоны от технологической скважины А-I определяется максимальными расстояниями трещин взрыва, вышедших на поверхность такыра (рис. 34). Если принять за радиус «безопасности» вокруг скважины А-I величину 150 м, а глубину зоны отторжения 200 м, то объем горного отвода составит $\sim 1,4 \cdot 10^7 \text{ м}^3$. Следует учесть, что отторгаемый горный отвод начинается непосредственно на поверхности дезактивированной территории площадки А-I.

Для площадки А-II выделяемый горный отвод находится в пределах соляного купола в интервале глубин 470-650 м и включает полость взрыва объемом $\sim 125\,000 \text{ м}^3$ и надполостную зону трещиноватости, максимальное распространение которой выше полости не более 3-х ее радиусов. В горизонтальном сечении принимается круговая зона с радиусом 100 м (~ 3 радиуса полости). В этом случае объем горного отвода в апикальной части купола Западный Азгир составит $\sim 6 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Наибольшее количество первичных взрывов – семь – было проведено в куполе Восточный Азгир. Взрыв А-IX проведен в глинах перекрывающей толщи. В качестве оптимальной принималась глубина заложения заряда $\sim 1000 \text{ м}$ [73]. На таких глубинах наиболее вероятно сравнительно быстрое залечивание поствзрывных трещин в соляном массиве и снижение до предельно малых величин проницаемости галитовых пород [33].

В качестве горного отвода в этом случае можно рассматривать пласт каменной соли мощностью 200 м, залегающий в интервале глубин 900 – 1100 м, площадь которого около 20 км^2 (см. рис. 31). Объем такого пласта составит $\sim 4 \cdot 10^9 \text{ м}^3$, а масса каменной соли горного отвода $\sim 9 \cdot 10^9 \text{ т}$.

Следует отметить, что общий объем полостей и суммарная масса находящихся в них радиоактивной переплавленной соли по отношению к объему и массе каменной соли условно выделенного горного отвода составляют крайне малые величины – порядка 0,02% по объему и 0,003% по массе.

Для корректировки размеров горного отвода необходима оценка максимального развития буферной зоны – радиоактивных ореолов вокруг полостей, заполненных рассолами, содержащими ^{90}Sr и ^{137}Cs . Водозаполненные полости являются основным источником миграции этих сравнительно долгоживущих техногенных радионуклидов по соляному массиву после проведения взрывов.

Размеры буферной зоны определяются проницаемостью вмещающих пород и скоростью миграции конкретного радионуклида в геохимической среде. Коэффициенты проницаемости каменной соли весьма малы и варьируют для различных структурно-минералогических типов каменной соли Большого Азгира от 10^{-9} до 10^{-13} см^2 [42, 52]. При этом количественные оценки свойств горных пород получены, как правило, в лабораторных условиях для образцов небольшого объема. Условия горного массива существенно отличаются от лабораторных, а в ряде случаев и от натуральных испытаний [118]. В частности, снятие литостатической нагрузки для каменной соли приводит к увеличению проницаемости. В отдельных образцах происходит вскрытие замкнутых газовой-жидких включений, после чего остаются характерные «взрывные» следы с остроугольными трещинами. Лабораторные оценки проницаемости, как правило, являются верхним пределом этой величины для массива.

Влияние размеров образцов (масштабный эффект) на определяемые в лабораторных условиях параметры каменной соли хорошо известно для специалистов, занимающихся созданием подземных сооружений в соляных массивах [28, 35].

В ненарушенном массиве солевых пород скорости движения рассолов не превышают значений $5 \cdot 10^{-7}$ м/сут при гидравлическом градиенте 0,01 м/м [52]. При таком значении водопроницаемости время просачивания рассола через пласт мощностью 100 м приближается к одному миллиону лет. При максимальном гидравлическом градиенте 7 м/м за тысячу лет рассол проникнет на расстояние не более 2,5 м. [42].

Значительно медленнее происходит диффузионный массоперенос. Коэффициенты диффузии для ионов ^{137}Cs и ^{241}Am по межкристаллическим включениям в каменной соли составляют $(3-7) \cdot 10^{-8}$ см²/с. При таких значениях размеры ореола диффузионного распространения этих радионуклидов составят 6-13 м за 10 000 лет.

Сделанные оценки показывают, что миграционные ореолы долгоживущих радионуклидов не проникнут за пределы границ горных отводов, объемы которых предварительно определены на основании размеров полостей, распространения вокруг них ореольных зон и разрывных нарушений.

② Следующий критерий определяет соответствие геологической формации типу, категории и количеству изолируемых РАО. Оцениваются возможности геологической среды для обеспечения требований, предъявляемых конкретными РАО и к стабильности создаваемой геотехнологической системы подземной изоляции на всех этапах ее существования. Рассматриваются литология, текстура и структура, плотность, прочность, пористость, теплопроводность и пр.

Многолетний опыт подземного строительства показал, что по технологичности, дешевизне, экологической целесообразности и сейсмической устойчивости толщи каменной соли являются наиболее перспективной геологической средой [27 - 29, 33, 35]. В настоящее время разработаны теоретические основы строительства и эксплуатации подземных сооружений в галогенных формациях. Решение проблемы удаления токсичных и радиоактивных отходов может быть осуществлено при использовании соленосных формаций, широко распространенных практически на всех материках.

Каменная соль может быть использована для наиболее жестких по радиационным и тепловым нагрузкам вариантов длительной изоляции РАО [42, 52, 102].

Галогенные породы солянокупольной структуры Большой Азгир являются характерными представителями соляных формаций и обладают всеми известными положительными свойствами и недостатками как среды для подземной изоляции РАО. При оценках безопасности захоронения отходов ядерно-взрывных технологий следует рассматривать изолирующие возможности конкретных геолого-геохимических условий с установленными формами нахождения техногенных радионуклидов, в первую очередь с полостными рассолами, содержащими ^{90}Sr ($1,8 \cdot 10^4$ - $3,0 \cdot 10^5$ Бк/л), ^{137}Cs ($2,4 \cdot 10^5$ - $3,0 \cdot 10^6$ Бк/л) и тритий ($n \cdot 10^4$ - $n \cdot 10^6$ Бк/л). Концентрации изотопов плутония в рассолах менее 3,7 Бк/л. В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 – это жидкие радиоактивные отходы. Отдельные участки надполостной зоны трещиноватости, переплавленная соль донной части полости соответствуют твердым радиоактивным отходам, для которых требуемое время изоляции составляет 300-500 лет. Силикатно-железистые

шлаки и гранулы, содержащие изотопы плутония, относятся к α -содержащим РАО, с продолжительностью изоляции 200-300 тыс. лет.

Оценка надежности подземной изоляции наиболее подвижных радиоактивных полостных рассолов в первую очередь будет определяться наличием или отсутствием каналов миграции в окружающую полость соляном массиве.

Для подземных взрывов большое значение имеют последствия искусственного воздействия на вмещающую среду ударного метаморфизма, создание в ней разрывных нарушений, неоднородностей и анизотропий. Образование трещин существенным образом зависит от структуры массива, его тектонических и литолого-петрографических особенностей. Например, для взрыва А-1 надполостные трещины достигли поверхности солевого штока, что связано с благоприятной для их развития внутренней слоистой структурой штока Чапчачи. Для всех других взрывов, проведенных на большей глубине, чем взрыв А-1, и в других структурно-геологических условиях, образующиеся вокруг полостей трещины не получили такого развития и, по крайней мере, не достигли ближайших водоносных горизонтов. Со временем трещины вокруг сухих полостей, по-видимому, будут залечиваться в упруго-пластической среде галитовых пород.

На макроуровне в соляных формациях основными каналами миграции являются ослабленные зоны разделения пород различного состава, например - галитовых прослоев и прослоев глинисто-карбонатных или ангидритовых пород. В пластовых телах контакты могут иметь достаточную протяженность, а на стратифицированных участках и значительную частоту по разрезу. Соляные массивы, сложенные различными литологическими разностями, могут быть крайне неоднородными. По своим минералого-структурным особенностям это могут быть однородные, непрерывно-неоднородные и дискретные соляные массивы [35]. Слоистые тестуры обладают резко выраженной анизотропией: достаточно высокой прочностью и низкой проницаемостью в направлении, перпендикулярном слоистости, и пониженной прочностью и высокой проницаемостью – в продольном [33]. Во всех случаях литологические границы являются наиболее вероятными каналами миграции.

Существенные изменения миграционной системы происходят в случае деформации соляных пород в условиях галокинеза и диапиризма, при которых глинисто-карбонатные или ангидритовые прослои разорваны и деформированы. Протяженные миграционные каналы обрываются, прослои примесных минералов превращаются в линзы, часто со сложной складчатой формой. Разрывы между прослоями заполняются галитом. Образуется характерная «кусочная» неоднородность массива. Миграционная система «замыкается на себя», создавая условия закрытости складчатых структур соляных тел [42]. Такие деформации характерны для солянокупольных структур. В частности, для купола Восточный Азгир, в котором прослои перекристаллизованного галита (1-4 см) или ангидрита (0,1-0,2 см) интенсивно деформированы, перемяты и будинированы. По отношению к вертикальной оси зерна они ориентированы под различными углами. Купол Восточный Азгир можно рассматривать как сравнительно гомогенизированный массив ангидрит-галитовых пород со сложноскладчатой внутренней структурой.

Для различных по структуре соляных залежей, пластовых телах или соляных куполов, для галитовых пород с различными примесными минералами постоянным фактором наличия и количественной оценки миграционных процессов является проницаемость каменной соли. Все горные породы состоят из двух неразделимых частей: твердого минерального скелета (матрицы) и трещинно-порового простран-

ства, параметры которого определяют проницаемость пород и, следовательно, параметры миграционного процесса. Конфигурация межкристаллического пространства сложная. Контактующие минералы могут иметь участки непосредственного соприкосновения, а форма и протяженность открытых пор и микротрещин чрезвычайно изменчива. Межкристаллические каналы горных пород визуальнo идентифицируются с использованием различных методов, например, введением радионуклидов или методом колористической пенетрации (рис. 58).

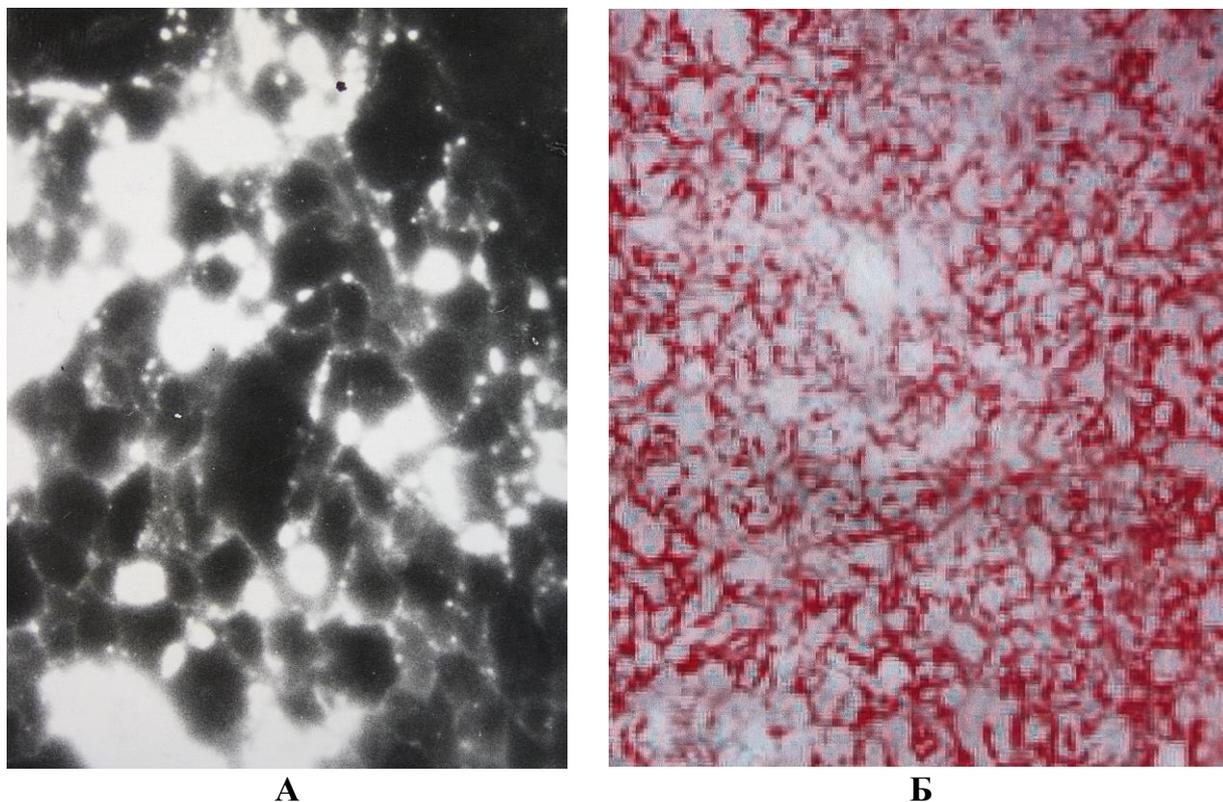


Рис. 58. А – автордиография среза галитовой породы после инъекции ^{90}Sr . Светлые («засвеченные») участки – плоскости межкристаллических разделов зерен галита, обогащенные ^{90}Sr . Увелич. 2,2 раза. Б – метод колористической пенетрации, межзерновая трещиноватость и сорбция красителя на пелитизированных участках полевых шпатов в гранодиорите. Увелич. 3 раза [119].

Радиографические исследования галитовых пород показали, что радионуклиды (^{90}Sr , ^{137}Cs) проникают в глубь образцов по системе межкристаллических включений – микроканалов сложной формы, сечением 10^{-3} - 10^{-5} мм², заполненных растворами и газами. Присутствие последних может создавать газовые затворы, которые ограничивают и изменяют направление миграции (рис. 59).

По результатам исследований солянокупольной структуры Большой Азгир выделены два типа газовой-жидких включений галитовых пород, различающихся по морфологии, происхождению, а также по своему значению для оценки изолирующих свойств каменной соли.

1) Внутрикристаллические включения представлены замкнутыми полостями, содержащими растворы, газы и твердую фазу [43]. Объем таких включений 10^{-5} - 10^{-7} мм³. В жидкой фазе присутствуют катионы калия, магния, а также сульфат-ион. Газы представлены смесью диоксида углерода, азота и метана. Давление

газов в замкнутых включениях варьирует и зависит от условий формирования конкретного участка диапировой структуры [42].

- 2) Межкристаллические включения представляют взаимосвязанную объемно-пространственную систему микрополостей и капилляров, расположенную на границах раздела кристаллов галита. Как правило – это плоские микрополости толщиной 5-10 мкм, имеющие в плоскости контакта кристаллов сложную извилистую форму и достигающие в «раздувах» величины 400-500 мкм. Полости соединяются между собой капиллярами диаметром 3-10 мкм (см. рис. 59). Межкристаллические включения обычно двухфазные – газовой-жидкие.

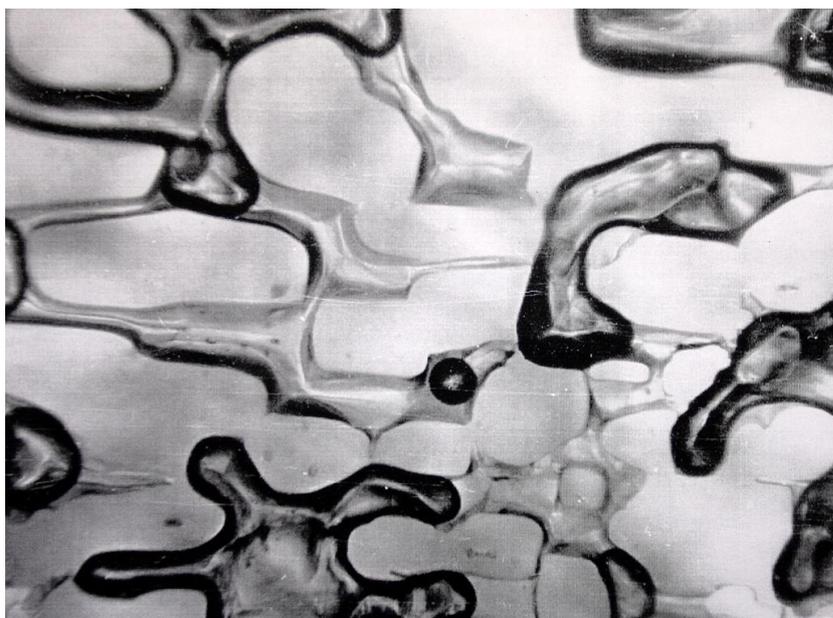


Рис.59. Межкристаллические газовые (темные) и жидкие (светлые) включения в каменной соли с сульфатными примесями. Газовые включения могут создавать «затворы», которые изменяют направление миграции. Увелич. 500 раз[113].

Замкнутые включения в неоднородных тепловых полях передвигаются по направлению к источнику тепла. Захоронение в солях тепловыделяющих отходов может привести к подтоку рассолов к местам расположения контейнеров, за чем последует коррозия и разрушение инженерного барьера [120]. Полученные данные выявили отрицательное влияние микроструктурных характеристик каменной соли на условия подземной изоляции тепловыделяющих ВАО.

Скапливающийся в донной части полости взрыва солевой расплав можно рассматривать в качестве аналога тепловыделяющих РАО и соответственно оценить влияние замкнутых газовой-жидких включений на условия изоляции отходов ядерно-взрывных технологий.

С этой целью были проведены специальные лабораторные эксперименты по визуальному наблюдению состояния включений во времени при различных режимах нагрева образцов каменной соли с различной структурой и различными примесными минералами. Проведено изучение проб дериватографическим и вакуумно-декрипитационным методами.

Проведенные исследования показали, что:

- декрипитация газовой-жидких включений начинается при температурах 60-80°C, а завершение – свыше 400°C;

- наиболее существенная реакция на термические воздействия наблюдается при температуре свыше 250°C;
- замкнутые газовой-жидкие включения, по мере своего продвижения к источнику тепла, достигают границ кристалла галита и «разгружаются» в систему межкристаллических включений, имеющих иной механизм миграции газовой-жидкой фазы;
- при нагревании каменной соли на сколах образцов происходит испарение рассолов с последующей закупоркой подводящих каналов; аналогичное явление будет происходить на поверхностях трещин в породе;
- продвижение замкнутых газовой-жидких включений прекращается при их контакте с включениям глинистых или сульфатных (ангидритовых) пород.

В галитовых породах с незначительными количествами примесных минералов свойства и особенности межкристаллической системы газовой-жидких включений определяют базовую характеристику геологической среды – проницаемость. В лабораторных условиях для образцов каменной соли структуры Большой Азгир коэффициент проницаемости по воздуху для высушенных образцов толщиной 2 см составляет $n \cdot 10^{-11} \text{ см}^2$ [52]. Эта величина несколько возрастает после нагрева образцов до температуры 300-350°C, что, по-видимому, связано с расширением миграционных каналов после взрывной декрипитации газовых включений.

③ Гидрогеологический критерий в качестве условий безопасности подземной изоляции РАО при выборе площадок для размещения хранилища (могильника) требует учитывать:

- зоны активного водообмена;
- минимальную связь (или ее отсутствие) гидрогеологической сети с подземными водами зоны размещения хранилища;
- физико-химический состав подземных вод выбранного участка, способный ограничивать миграционные процессы изолируемых радионуклидов.

В главе 1.3. было показано, что существование вокруг соляных залежей тяжелых, вязких рассолов является природным барьером, защищающим каменную соль от растворения. Одновременно гравитационные гидрологические системы при отсутствии гидродинамического напора, способного распространять радионуклиды по каналам миграции, функционируют в качестве геохимического барьера. В стабильных гравитационно-гидрогеологических системах распространение радионуклидов будет определяться крайне медленным диффузионным переносом [42].

Для оценки гидрогеологической «закрытости» солянокупольной структуры Большой Азгир необходимо рассмотреть структурно-гидрогеологические особенности соляного штока Чапчачи, купола Западный Азгир и купола Восточный Азгир, участки солянокупольной структуры, где проводились взрывы (см. рис. 31). На участке проведения взрыва А-І газообразные предшественники ^{90}Sr и ^{137}Cs достигли поверхности соляного штока на дне небольшого такыра (см. рис. 34) Здесь донная (солевая) часть такыра перекрыта суглинками мощностью 1-2 м. В 1990 г. промплощадка А-І и прилегающие к ней загрязненные участки были дезактивированы и рекультивированы [93].

После проведения ядерного взрыва в каменной соли образуются несколько типов радиоактивных отходов и несколько форм нахождения в них техногенных радионуклидов.

- силикатно-железистые шлаки, силикатные минералы и пр., содержащие группу радионуклидов – изотопов тугоплавких элементов, в том числе плутоний;

- преобладающая по количеству (1000 т на 1 кт мощности взрыва) масса твердой переплавленной каменной соли, содержащая ^{90}Sr и ^{137}Cs . В солях с примесью ангидрита в переплавленной соли присутствуют в рассеянном состоянии высокотемпературные минералы и шлаки.
- жидкие радиоактивные отходы – рассолы, содержащие ^{90}Sr на уровнях $n \cdot 10^4$ Бк/л и ^{137}Cs $n \cdot 10^5$ Бк/л на момент образования в водозаполненных полостях.

Для условий взрыва А-I наиболее стабильной формой нахождения техногенных радионуклидов являются силикатно-железистые шлаки и гранулы придонной части полости, перекрытые слоем переплавленной соли и породами навала.

Сама переплавленная соль внутренней зоны полости полностью совместима со вмещающим соляным массивом, и ее размыв возможен пресными водами при целенаправленном техногенном вмешательстве. Природный вариант такого размыва маловероятен.

Наиболее способными к перемещению являются внутривоздушные рассолы. Однако, они вместе с надсолевыми водами неогена (апшеронский ярус) образуют на участке проведения взрыва А-I гравитационно-устойчивую водную систему.

По вертикальному разрезу площадки А-I происходит увеличение минерализации, а соответственно и плотности подземных растворов (таблица 29).

Таблица 29. Гравитационно-устойчивая система подземных растворов на участке проведения взрыва А-I

Вмещающие породы, глубина отбора проб, м	Минерализация раствора, г/л	Плотность раствора, г/см ³
Супеси, N _{2ap} , 24,0	37,7	1,04
Суглинки, N _{2ap} , 126,5	144,7	1,09
Каменная соль, P _{1kg} (полость взрыва А-I), 145,0-165,0	330	1,20

В приведенном диапазоне концентраций рассолов изменение вязкости происходит незначительно. Однако, в насыщенных рассолах вязкость достигает величины 2, 60 спуаз. Средняя величина вязкости воды в нормальных условиях не превышает 1,31 спуаз [22].

Для перемещения тяжелого полостного рассола требуется высокий напор инфильтрационных вод, который нереален в равнинных условиях площадки «Галит».

Основным механизмом миграции радионуклидов в условиях гравитационно-устойчивой системы хлоридно-натриевых растворов является диффузионный перенос. Расчетные оценки показывают, что даже в случае отсутствия каких-либо сдерживающих факторов (сорбция на глинах, соосаждение, сокристаллизация и пр.) радионуклиды из растворов в полости смогут распространиться за ее пределы не более чем на 60 м за 300 лет [42, 52].

Для радиоактивных рассолов полости А-I существенное значение имеют вторичные процессы сорбции ^{137}Cs на мелкодисперсном глинистом осадке, кото-

рый совместно с солью-самосадкой находится на поверхности навала, т.е. на дне полости.

На участке проведения первичного взрыва А-II и затем повторных взрывов А-II-2 – А-II-7 основным водоносным горизонтом является комплекс песчаных пород неогена, апшеронского горизонта – N^2ap , перекрывающих купол Западный Азгир (рис. 47). В толще неогеновых пород насчитывается до 4-х прослоев водоносных песков. Присутствуют многочисленные маломощные прослой и линзы алевролитов. Подземные воды неогенового комплекса напорные. Величина напора возрастает с увеличением глубины залегания водоноса. По фильтрационным свойствам в силу своей литологической неоднородности водопроницаемость варьирует от 0,012 до 28 м/сут. Средняя величина коэффициента фильтрации на участке взрыва А-II составляет не более 0,65 м/сут. Степень хлоридно-натриевой минерализации возрастает с увеличением глубины.

Водоносный горизонт кунгурских отложений P_1kg залегает в гипсово-ангидритовых породах, перекрывающих соляной купол Западный Азгир (рис. 47). Это трещинно-пластовые высокоминерализованные воды с коэффициентом фильтрации не более 0,016 м/сут. Воды высоконапорные.

Таким образом, надсолевые водоносные горизонты площадки А-II в совокупности с полостными рассолами образуют гидрогеологическую систему, находящуюся в состоянии гравитационной устойчивости (табл. 30).

Таблица 30. Гравитационно-устойчивая система подземных растворов на участке проведения взрыва А-II

Вмещающие породы	Глубина, м	Минерализация, раствора, г/л	Плотность раствора, г/см ³
Пески, N_2ap	28,0	28,4	1,02
Пески, N_2ap	200-211	43,6	1,13
Ангидриты, P_1kg	282	198,0	1,17
Каменная соль, P_1kg (полость взрыва А-II)	560-600	312,9	1,21

Необходимо отметить, что в водозаполненной технологической скважине А-II после проведения повторных взрывов длительное время (1979-1991 гг.) на глубине 300 м сохранялась четкая граница между радиоактивным рассолом полости и менее минерализованными (30 г/л) и на два порядка менее радиоактивными скважинными водами [100].

Значительно усиливает барьерные свойства надсолевой толщи Западного Азгира присутствие водонепроницаемых глинистых прослоев апшеронского яруса верхнего неогена (рис.47). При этом задержка радионуклидов будет зависеть не только от состава глинистых пород, но и от минерализации транспортирующих эти радионуклиды растворов. В рассолах коэффициент распределения Kd ^{137}Cs для отдельных проб неогеновых глин и суглинков варьирует от 160 до 370 мл/г. Для песков и супесей этого же возраста – 5-6 мл/г, для галита и ангидрита – менее единицы. Коэффициенты распределения ^{90}Sr для перечисленных пород и минералов, как правило, меньше единицы.

Для неогеновых глин монтмориллонит-иллит-каолинитового состава наиболее велики различия коэффициентов распределения в пресной воде и рассоле для ^{90}Sr , но практически не меняются для ^{239}Pu (табл. 31).

Таблица 31. Коэффициент распределения радионуклидов в пресной воде и насыщенных рассолах для монтмориллонит-иллит-каолинитовых глин неогена

Радионуклид	Коэффициент распределения, K_d	
	Вода	Рассол
^{137}Cs	10^3	350-370
^{90}Sr	300	1
^{239}Pu	10^3-10^4	10^3-10^4

Дополнительным барьером для ^{90}Sr являются надсолевые воды кугурского горизонта, приуроченные к зонам трещиноватости в гипсо-ангидритовой толще. Присутствие в этих рассолах сульфат-иона (5,05 г/л) приводит к образованию труднорастворимых сульфатов щелочно-земельных металлов. Для стронция это минерал целестин SrSO_4 , часто встречающийся совместно с гипсом, ангидритом и галитом [36].

Условия изоляции полости взрыва А-II более надёжные, чем полости А-I, поскольку купол Западный Азгир перекрыт природной барьерной системой, сохраняющей стабильность солевых пород в течение миллионов лет.

При проведении повторных ядерных взрывов в водозаполненной полости А-II возникало избыточное давление, наличие которого требовало для проведения пробоотбора контролируемое стравливание парогазовой смеси в атмосферу (табл. 32) [87].

Таблица 32. Характеристика радиационной обстановки при контролируемом стравливании после повторных взрывов в полости А-II. С добавлениями по [87]

Параметры	Количественная характеристика параметров		
	А-II-2	А-II-3	А-II-6
Начало стравливания после взрыва, ч	7,5	5,0	3,1
Продолжительность стравливания, ч	14	24	16
Объем выпущенного газа, м ³	32	0,8	12
Максимальная мощность дозы гамма-излучения на месте выхода газов, Р/ч	~2	~2	~150
Максимальная протяженность (км) газового факела по изодозе 25 мкР/ч	2,0	0,5	0,5
Суммарная активность вышедших радионуклидов, Бк			
– РБГ (короткоживущие)	$3,3 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{10}$	$1,5 \cdot 10^{14}$
– йод-131	$7,4 \cdot 10^9$	Не обн.	Не обн.
– тритий	$7,4 \cdot 10^7$	$3,7 \cdot 10^6$	Не обн.

Зарегистрированные радионуклиды выходили из полости в виде газов по технологической скважине и затем по специальной системе газового пробоотбора, обеспечивающего безопасность и представительность отбора проб. Объемная активность первичных аэрозолей была ниже 10^{-3} Бк/л.

Проведенные после каждого повторного взрыва исследования установили, что стравливания из полости А-II не вызвали остаточных радиоактивных загрязнений территории за пределами техплощадки [87].

Среди надсолевых пород купола Восточный Азгир наиболее водообильными являются пески и песчаники с нерасчлененным пермо-триасовым возрастом (~ 260-245 млн. лет). По данным гидрогеологических скважин динамический уровень этих вод составляет 30-70 м. При расходе 0,75-3,0 м³/час понижение водного уровня составило 20-30 метров. По своему составу – это хлоридно-натриевые растворы, минерализация которых зависит от глубины залегания водоносного горизонта. На площадке взрыва А-IV в интервале глубин 170-215 м минерализация пермо-триасовых вод 58,5 г/л. На площадке взрыва А-V на глубине 265-275 м она повысилась до 134 г/л.

Водоносными являются нижележащие кавернозные известняки верхней перми, казанского яруса (~ 260-255 млн. лет). В интервале глубин 186-192 м минерализация хлоридно-натриевых рассолов казанских известняков достигала 286 г/л. Используя методы определения возраста вод по изотопам редких газов [25], получена «возрастная метка» растворов в казанских известняках, которая соответствовала возрасту 1,5-3,4 млн. лет.

Наиболее глубокий водоносный горизонт высокоминерализованных рассолов находится в гипсово-ангидритовых породах, перекрывающих каменную соль.

В целом для купола Восточный Азгир характерна аналогичная для Западного купола гравитационно-устойчивая система подземных минерализованных вод. При этом основным природным барьером для техногенных радионуклидов подземных ядерных взрывов является толща глинистых отложений неогена, мощностью от 100 до 263 м (см. рис. 49). В начале плейстоцена (1,8 млн. лет) на обширной территории Северного Прикаспия сказывается влияние Апшеронской морской трансгрессии. Солянокупольные структуры, в том числе и купол Восточный Азгир, перекрываются глинистыми отложениями. Мощный пласт глин неогена является не только гидроизолирующим, но и природным сорбционным барьером, обеспечивающим изоляцию техногенных радионуклидов подземных ядерных взрывов, проведенных в куполе Восточный Азгир.

④ Четвертый критерий оценивает условия геологической среды, которые способны ограничить миграцию радионуклидов. Рассматриваются в первую очередь геохимические барьеры вмещающих горных пород, их сорбционная емкость, степень задержки радионуклидов и пр.

Сорбция радионуклидов каменной солью с примесями ангидрита и карбонатов весьма мала. Коэффициент распределения K_d для ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в рассолах обычно не превышает единицы [42]. Сорбционная способность увеличивается для галитовых пород с примесью глинистых минералов.

Отсутствие удерживающих свойств компенсируется низкой проницаемостью соляных пород. Эти свойства были рассмотрены выше при оценках общих геологических условий – критерий ②. Залежи каменной соли обладают хорошими изо-

лирующими свойствами благодаря пластичности и способности залечивать разрывные нарушения (см. раздел 1.1. Экранирующие свойства соленосных формаций).

Как уже рассматривалось выше, основными барьерами, изолирующими техногенные радионуклиды ядерных взрывов в солянокупольной структуре Большой Азгир, являются:

- гравитационно-устойчивая система подземных вод – хлоридно-натриевых растворов;
- пласты глинистых пород, перекрывающих Восточный и Западный купола.

⑤ Сейсмо-тектонический критерий требует выбора площадок с благоприятной (пассивной) тектонической и геодинамической обстановкой.

Прикаспийская низменность – крупнейшая отрицательная структура Восточно-Европейской платформы. Мощность осадочного чехла в её центральных частях достигает 22 км. Нижележащий кристаллический фундамент разбит дизъюнктивными нарушениями на систему блоков. Северный Прикаспий – это самая большая в мире аккумулятивная равнина с плоским рельефом, со слабым проявлением неотектонических движений и практическим отсутствием сильных землетрясений [16].

На фоне спокойного тектонического развития наиболее активным фактором, влияющим на строение крупнейшей равнинной структуры, является соляной диапиризм.

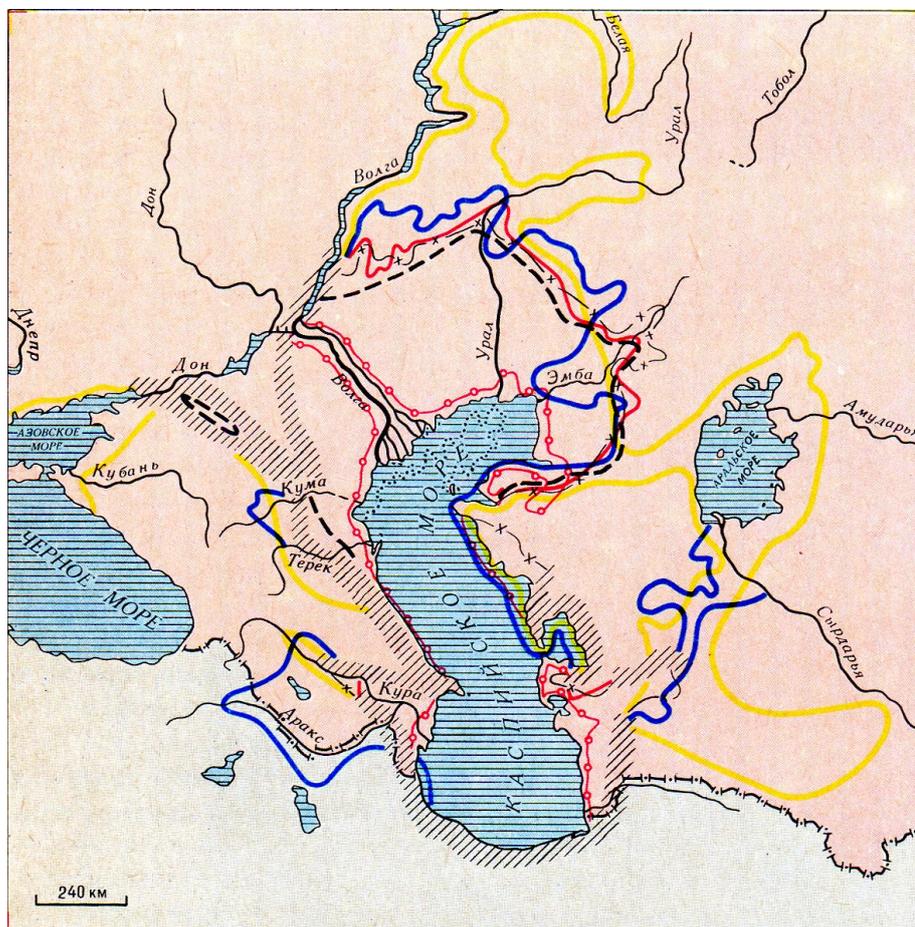
Прикаспийская низменность – регион широкого развития солянокупольных структур (более 1200), в число которых входит и структура Большой Азгир. Зарождение и рост соляных куполов обусловлен, как правило, блоковыми подвижками подсолевого фундамента. Глубина залегания подсолевых пород (докунгурских) в центральных частях низменности достигает в настоящее время 10 км [17]. Наблюдается пространственная связь диапировых структур с крупными тектоническими нарушениями земной коры. Масштабы таких нарушений могут варьировать от сотен километров для региональных кольцевых структур и до более мелких «полигонов» с длиной сторон в несколько десятков километров

Для крупных солеродных бассейнов устанавливается скачкообразный подъем соляных ядер, совпадающий по времени с активностью региональных тектонических фаз, усилением движений подсолевого фундамента. Для Прикаспия наиболее мощные подвижки соляных пластов начались на границе перми и триаса, ~ 250 млн. лет назад. Самые поздние активные подвижки куполов произошли в плиоцене, ~ 3 млн. лет назад.

Скорость роста наиболее активных куполов Прикаспия достигает 1,3 мм/год [121]. При такой скорости подъема в случае залегания кровли купола на глубине 300 м (например, как для Западного купола Большого Азгира) для выведения соляных пород на поверхность потребуется почти четверть миллиона лет. Рост куполов не может каким-то образом изменить существующее в настоящее время положение или нарушить стабильность полостей подземных ядерных взрывов.

Развитие последнего тектонического этапа движений началось ~ 25 млн. лет назад. В пределах Северного Прикаспия эти движения носили колебательный характер, с амплитудами в пределах десятых и сотых долей миллиметра в год. Суммарный эффект тектонических движений приводил к наступлению и отступлению Пра-Каспия на сушу – к морским трансгрессиям и регрессиям. Территорию покры-

вали различные по площади, глубине и конфигурации моря – акчагыльское, апшеронское в позднем плиоцене, а в четвертичном периоде – бакинское, хазарское, хвалынское и новокаспийское моря (рис 60 [122]). При этом во время крупных трансгрессий продолжались малоамплитудные тектонические движения, изменяющие очертания северной части Пракаспийского бассейна [123].



Пракаспийские озерно-морские бассейны

- | | | | |
|---------------------------|-----------------|-----------------------|---|
| — (yellow line) | Акчагыльский | //// (diagonal lines) | Контуры, почти совпадающие на разных этапах существования бассейнов |
| — (blue line) | Апшеронский | | |
| - - - (dashed line) | Позднебакинский | | |
| — (red line) | Раннехазарский | | |
| - x - (line with crosses) | Раннехвалынский | (dotted line) | Ожидаемая береговая линия в случае снижения уровня Каспия на 3 м |
| — (red line with circles) | Новокаспийский | | |

Рис. 60. Пра-Каспий и Каспий. Иллюстрация из [122].

Например, уровень раннехвалынского моря (~ 20 тыс. лет назад) достигал плюс 49 м от отметки Мирового океана. Приблизительно 15 тыс. лет назад море отступило до очертаний, близких к современным. В позднехвалынской время вновь начался подъем до отметки 0 м. В регрессивную фазу, которая началась ~ 10 тыс. лет назад, Каспийское море неоднократно наступало и отступало. Его уровень колебался в интервале минус 20 – минус 32 м. В тридцатые годы XX века наблюдался устойчивый спад моря, самый низкий уровень минус 29,03 м был достигнут в

1977 году. С 1978 года уровень воды повышался и в 1995 году достиг отметки минус 26,7 м. В дальнейшем наметилась тенденция к понижению [124].

Причины изменения уровня Каспийского моря связывают с геологическими, климатическими и антропогенными факторами. Среди природных факторов следует отметить возможность взаимного наложения различных по продолжительности климатических циклов, в их числе ритмов с периодами 11, 35, 120 и 480 лет. На колебания уровней Каспия влияют глобальные неотектонические процессы. Предполагается, что в фазе сжатия может происходить отдача поровых вод осадочных толщ региона, а в фазе растяжения – возможен обратный процесс [125].

По оценкам карты сейсмического районирования ОСР-97 (карта В) для всей территории Прикаспийской низменности расчетная интенсивность землетрясений не превысит 5 баллов [126]. Это соответствует 5%-ной вероятности превышения (т.е. 95%-ной вероятности не превышения) указанной для данной территории сотрясений расчетной интенсивности в течение 50 лет. Период их повторяемости – один раз в 1000 лет. При этом следует отметить, что для глубинных условий расчетная по карте сейсмичность снижается на два балла [127]. Следовательно, сейсмический фактор не является причиной для изменения условий начального размещения полостей и продуктов взрыва, или образования новых каналов миграции в соляном массиве.

⑥ Следующий критерий требует оценки техногенных (искусственных) и природных факторов, влияющих на безопасность подземной изоляции радионуклидов.

Техногенный фактор для площадки «Азгир» учтен в документах передачи территории, использованной для проведения подземных ядерных взрывов, ее владельцу в Республике Казахстан [87]. На выделенных участках солянокупольной структуры Большой Азгир введены ограничения на бурение глубоких скважин в непосредственной близости от полостей и ведение каких-либо других горнопроходческих работ.

Научно обоснованных доказательств существенного изменения режима геоморфологических и климатических факторов на рассматриваемой территории в настоящее время нет. В ближайшем геологическом будущем наиболее вероятна возможность очередной трансгрессии Каспия с включением в акваторию водного бассейна района Большого Азгира. Примеры прошедших морских трансгрессий показывают, что постепенное подтопление территорий развития солянокупольных структур не оказывает существенного влияния на внутренние, глубинные зоны соляных залежей. Более того, последующие процессы осадкообразования дополнительно перекрывают апикальные участки солянокупольных структур [128].

⑦ Следующий критерий ограничивает или исключает использование для подземной изоляции РАО участков размещения полезных ископаемых, современных или потенциальных геологических ресурсов.

Каменная соль – полезное ископаемое, без которого современное человечество не может существовать. Использование крупных соляных массивов для проведения ядерных взрывов можно отнести к неоправданному расточительству, загрязнению ценного геологического ресурса.

При анализе требований этого критерия необходимо учесть грандиозные объемы соляных формаций, которые по количеству разведанных запасов состав-

ляют $1.5-2,0 \cdot 10^{16}$ т (см. табл. 1). Очевидно, что запасы каменной соли настолько велики, что выделение локальных участков не только для изучения ядерных взрывов, но и для строительства подземных хранилищ РАО (Германия, США) не нанесет серьезного ущерба ее ресурсам.

Для соляных формаций в начале 90-х годов были разработаны дополнительные критерии, характеризующие эти породы как геологическую среду для долгосрочной подземной изоляции РАО [42, 112].

Первый из этих критериев относился к наличию миграционных процессов внутри соляных массивов. В качестве примеров рассмотрены соляные формации различных регионов. На территории Донецкого бассейна в солях пермского возраста в пласте каменной соли мощностью 30 м присутствуют прослои с резко повышенными содержаниями марганца, титана, ванадия и меди. Эти прослои используются для корреляции отдельных толщ всей соленосной формации. Установлено, что в течение ~ 270 млн. лет миграция и выравнивание концентраций примесных элементов, не характерных для процессов галогенеза, в каменной соли не происходили [129].

В породах соляного штока Чапчачи аналогичного пермского возраста сохранились маломощные контрастные прослои туффитов с реликтами вулканических стекол [103]. Изучение внедрения долеритовой интрузии в солевые залежи нижнего кембрия Сибирской платформы показало, что проникновение силикатного расплава в каменную соль в течение ~ 350 млн. лет [97] не привело к их взаимодействию и взаимной миграции компонентов. Пласты каменной соли являются стабильными и долгосрочными газоупорами. В Припятском бассейне соляные породы нижнего девона (~ 410 млн. лет) оказались закрытой геохимической системой для азота, возникающего в процессе перекристаллизации карналлита [130].

Следовательно, инертность и стабильность соляных залежей может быть подтверждена отсутствием в течение геологического времени каких-либо миграционных процессов между вмещающей средой (каменной солью) и её компонентами, генетически не связанными с процессами солеобразования.

Второй дополнительный критерий имеет следующую формулировку: для изоляции долгоживущих радионуклидов должен быть выбран соляной массив, находящийся длительное время «закрытым» для изотопно-геохронологической системы $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$. Критерий подразумевает возможность использования калий-аргонового метода для определения абсолютного возраста каменной соли, что является достаточно сложной задачей по ряду причин [56-59]:

- при низких содержаниях калия в собственно галитовой породе (0,01-0,001 мас. %) увеличиваются аналитические погрешности и трудности получения представительных проб;
- в соляных породах могут присутствовать примеси тонкодисперсного терригенного материала, сохраняющего возрастную метку древних пород;
- для калиевых минералов соляных пород возможны низкотемпературные потери радиогенного аргона;
- наложение молодых метаморфических процессов в первую очередь приводит к перекристаллизации калиевых минералов;
- включения калиевых минералов под влиянием постоянно действующих глобальных литосферных вибраций сравнительно легко могут терять радиогенный аргон, который перемещается в межкристаллические газово-жидкие включения.

Существующие осложнения не исключают возможность получения надёжных изотопно-геохронологических данных для первичных или вторичных калиевых минералов, для прослоев туффитов в галитовых породах и пр. [42, 58].

На каменной соли Большого Азгира проводилась отработка различных вариантов пробоподготовки и проведения аналитических операций, оценивалось влияние количеств и состава примесных минералов на получаемые возрастные метки. Детальные исследования использования калий-аргонового метода проведены позднее в процессе изучения Сеитовской солянокупольной структуры [42, 111].

Оценка надёжности подземной изоляции радиоактивных отходов ядерно-взрывных технологий на площадке «Галит», наряду с проведенным анализом соответствия с требованиями базовых геологических критериев МАГАТЭ, определялась непосредственными измерениями содержаний радионуклидов в контрольных скважинах, пробуренных вблизи водозаполненных полостей – потенциальных источников миграции (табл. 33).

Все три контрольные скважины площадки А-I пробурены в приповерхностную часть соляного штока Чапчачи над полостью взрыва. Анализ хлоридно-натриевых растворов (~ 30 г/л) подтвердил загрязнение подземных вод на участке проведения взрыва А-I. Максимальные уровни концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs наблюдаются вблизи технологической скважины. Наряду с основным одномоментным попаданием газообразных предшественников этих двух радионуклидов в подземные воды не исключено техногенное загрязнение приповерхностных вод во время нескольких пробоборных операций, а также пуско-наладочных и опытных работ установки «Эрлифт».

Таблица 33. Концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в водных растворах контрольно-наблюдательных скважин в 1989-1991 гг. [100]

Контрольные скважины	Расстояния от технологических скважин, м	Глубина контрольных скважин, м	Концентрации, Бк/л	
			^{90}Sr	^{137}Cs
А-I-1	13,5	50	14,8	161,5
А-I-2	25,0	50	–	141,5
А-I-3	49,0	50	3,0	18,6
А-II-1	30,0	225	0,05	0,04
А-II-2	70,0	225	0,02	0,03
А-III-1	200,0	250	0,37	0,66
А-IV-1	30,0	225	0,03	0,36
А-IV-2	70,0	225	0,02	0,08
А-V-1	50,0	280	0,15	6,1
А-V-2	100,0	280	3,7	17,7
Допустимые концентрации в воде, ДК _Б *			14,8	555

* В первоисточнике [100] приведены значения ДК_Б в соответствии с НРБ-76 и ОСП-72/80 / М-во здравоохранения СССР. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 96 с.

На площадке А-II отборы водных проб контрольными скважинами производились из наиболее глубокого водоносного горизонта песчаных пород апшеронских отложений (рис. 47). Минерализация хлоридно-натриевых вод скважин составляет 17,6 и 2,3 г/л. Радиоактивное загрязнение не обнаружено.

Отсутствие радиоактивного загрязнения показали анализы вод контрольных скважин на площадке А-III в рассолах с минерализацией 117 г/л, приуроченных к гипсово-ангидритовым породам перми (P_1kg) и на площадке А-IV по результатам опробования минерализованных вод (58,5-87,8 г/л) пермских известняков казанского яруса (P_2kz).

Остаются невыясненными условия загрязнения подземных вод площадки А-V (водоносные пески пермо-триаса с концентрацией рассолов 55-60 г/л). Повышенные концентрации радионуклидов сохранялись в течение всех трех лет наблюдений (табл. 34). Не исключено, что проникновение радионуклидов в водоносный горизонт связано с нарушением изоляции технологической скважины, на которой проводились длительные испытания по определению величины конвергенции водозаполненной полости.

Таблица 34. Содержание ^{137}Cs в подземных водах контрольных скважин площадки А-V

Годы наблюдений	^{137}Cs , Бк/л	
	Скв. А-V-1	Скв. А-V-2
1989	10,2	–
1990	6,1	17,7
1991	7,0	12,0

По результатам анализа системы миграции радионуклидов на солянокупольной структуре Большой Азгир определены ее следующие характерные особенности [100].

- 1) Мигрирующие радионуклиды. Наиболее вероятна миграция долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs , присутствующих в хлоридно-натриевых насыщенных растворах полостей А-I, А-II, А-III, А-IV и А-V. За время наблюдений концентрации растворов не изменились. Долгоживущие радионуклиды делящегося изотопа прочно удерживаются нерастворимыми силикатными минералами и силикатно-железистыми шлаками.
- 2) Каналы миграции. Основными каналами миграции являются зоны нарушений и трещиноватости, образующиеся в каменной соли при взрыве. Кроме того, все полости имеют (или имели до консервации площадок) связь с поверхностью через технологическую скважину, скважины пробоотбора и контрольных наблюдений.
- 3) Среда миграции. Миграция радионуклидов происходит в хлоридно-натриевых растворах, с увеличением минерализации которых уменьшается сорбционно-удерживающие свойства минералов – природных сорбентов. В контрольных скважинах различных площадок увеличение минерализации подземных вод от 2,3 до 117,0 г/л коэффициент распределения K_d для ^{137}Cs уменьшался от 10^3 до 16.

Для солянокупольной структуры Большой Азгир, как и для многих других районов развития солевых формаций, создана гравитационно-устойчивая водная система, обеспечивающая боковую и вертикальную закрытость соляных залежей. Система включает несколько водоносных горизонтов, в которых по мере приближения к соляным породам возрастает минерализация, плотность и вязкость растворов хлористого натрия. В районе Большого Азгира почти пресные приповерхностные воды на глубине сменяются насыщенными рассолами с минерализацией ~ 300 г/л, плотностью ~ 1,2 г/см³ и вязкостью ~ 2,5 спуаз.

- 4) Геологическое (минералого-структурное) окружение и геохимические барьеры. Величина проницаемости массивной однородной каменной соли крайне мала – $10^{-9} - 10^{-13}$ см². При этом отсутствуют удерживающие свойства соляных пород. Коэффициенты распределения ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в системе каменная соль – рассол меньше единицы. Основными гидроизолирующими и сорбционными барьерами соляных формаций являются перекрывающие их глинистые породы, присутствие которых часто является необходимым условием сохранения легкорастворимых галитовых пород. Для глин в насыщенных рассолах коэффициент распределения K_d для ¹³⁷Cs варьирует в пределах $(2-4) \cdot 10^2$. Для ⁹⁰Sr природными барьерами являются надсолевые воды, содержащие сульфат-ион. В рассолах водозаполненных полостей взрывов за счет осаждения сульфата стронция с образованием минерала целестина изменяются, как это было отмечено выше, начальные соотношения ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs.
- 5) Основные механизмы миграции. При существующих условиях малоподвижных гравитационно-устойчивых водных систем основным механизмом миграции следует считать диффузию. Коэффициенты диффузии ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs не превысят 10^{-6} см²/с, что соответствует распространению радиоактивного ореола вокруг водозаполненной полости в каменной соли на максимальные расстояния первых десятков метров за 300-500 лет.

Анализ системы миграции и результаты обследования наблюдательных скважин на площадке «Галит» в 1989-1991 гг. были представлены в докладе на американо-немецком семинаре по изучению, строительству и функционированию хранилищ РАО в каменной соли в 2010 г. [131]. Центральные зоны ядерных взрывов являются своеобразными аналогами захоронения РАО, в которых отсутствуют инженерные барьеры и искусственные формы иммобилизации радионуклидов. Единственным барьером является геологическая формация, в данном случае – солянокупольная структура Большой Азгир. Проведенный анализ имеющихся данных показали надежность подземной изоляции техногенных радионуклидов в массиве каменной соли.

При анализе условий изоляции радионуклидов в геологических формациях неоднократно отмечалось, что миграция – это сложный многокомпонентный процесс, который реализуется при одновременном существовании нескольких благоприятных условий. Отсутствие хотя бы одного из компонентов может исключить процесс в целом. [42, 100, 112]. Для долгоживущих радионуклидов, например ²³⁹Pu с периодом полураспада 24 400 лет, необходимое время подземной изоляции (~ 250 000 лет) охватывает сравнительно крупные циклы эволюции поверхности Земли, во время которых миграционная система может существенным образом измениться. В этом случае необходим прогноз условий безопасности удаления долгоживущих радионуклидов для определенной геологической формации. Прогноз,

опирающийся на историю образования и закономерности развития конкретного региона [112]. Реконструировать состояние участка литосферы на будущие сотни тысяч лет возможно геологическими методами, используя комплексный подход, фундаментальные закономерности образования и развития геологических тел, дифференциальный анализ развития событий в пространстве и во времени [132].

Перспективы геологического развития какой-либо геологической структуры основываются на установленной истории и закономерностях её эволюции в прошлом. Основой прогноза системы миграции может стать реконструкция геологической и тектонической обстановки.

Прикаспийская впадина – одна из крупнейших тектонических депрессий мира, занимающая площадь более 500 тыс. км². В ходе своего развития она испытывала устойчивое погружение на протяжении всего фанерозоя, т.е. в течение почти 500 млн. лет [133]. Кристаллический фундамент разбит на блоки и залегает на глубине 22-23 км. В толще осадочного чехла выделяют два структурных этажа: подсолевой, сложенный карбонатно-терригенными породами палеозойского возраста, и солянокупольный, представленный галогенно-терригенными породами от кунгурского яруса нижней перми до четвертичного возраста включительно. Процессы диапиризма оказали существенное влияние на структурные особенности надсолевых отложений, но и сами они, в свою очередь, тесно связаны с региональными тектоническими структурами. Активно внедряясь в перекрывающие породы, соляные диапиры образовывали в них разрывные нарушения, которые могли впоследствии залечиваться соляными породами. Пластичные массы каменной соли создавали барьеры и «ловушки» для углеводородного сырья – газа, газоконденсата. Отсутствие разломов и систем терещиноватости, быстрое залечивание трещин, водо- и флюидонепроницаемость определили важную роль соляных массивов в качестве разграничивающих и изолирующих структур, часто имеющих региональное значение [33].

Наряду с огромными соляными массивами со столообразными плоскими сводами Центрального Прикаспия, в краевых частях синеклизы галогенные диапиры входят в состав сложных надвиговых структур с разрывными дислокациями [12].

В дочетвертичное и четвертичное время происходили колебания уровня Прикаспия с периодическими затоплениями значительных территорий Прикаспийской низменности (рис. 60). На колебании уровня морского бассейна сказывались перемены климата, в частности появление талых ледниковых вод. На перемещение линии берегов влияли и тектонические факторы: продолжавшиеся прогибы впадины или поднятия отдельных подводных порогов.

Во время морских трансгрессий соляные купола перекрывались осадочными песчано-глинистыми породами апшеронского яруса неогена, хазарскими и хвалинскими осадками четвертичного времени.

В солянокупольной структуре Большой Азгир нарушение условий изолируемых радионуклидов за длительные промежутки времени могут быть связаны с возникновением следующих неблагоприятных ситуаций:

- размывом и денудацией соляного массива, включая горный отвод и полости взрыва, вследствие коренной перестройки тектонической структуры крупного литосферного блока

- вскрытием полостей разрывными нарушениями, образовавшимися в результате тектонических преобразований региона, с последующим размывом радиоактивных продуктов взрыва пресными водами.

Перечисленные неблагоприятные ситуации могут быть реализованы только в случаях коренного изменения режима развития крупной геологической структуры – Прикаспийской синеклизы. Для таких перестроек требуются серьезные глобально-тектонические или планетарно-климатические преобразования, которые осуществляются в течение десятков и сотен миллионов лет.

Для Северного Прикаспия в ближайшем геологическом будущем (десятки и сотни тысячи лет) какие-либо коренные изменения геолого-тектонического или климатического режима маловероятны. Предполагается сохранение колебаний уровня Каспия с периодическими затоплениями низменных территорий и продолжающийся рост солянокупольных структур со средними скоростями в пределах 0,1-1,0 мм/год.

Наиболее вероятной причиной нарушения изоляции полостей в солянокупольной структуре Большой Азгир в будущем может быть их искусственное вскрытие горно-техническими средствами, вследствие потери информации о проведенных здесь во второй половине XX века подземных ядерных взрывах.

6. Полости-хранилища на Оренбургском газоконденсатном месторождении

Основной задачей проведения подземных ядерных взрывов в каменной соли считалось создание полостей-хранилищ для углеводородного сырья. Открытие на территории Советского Союза таких крупных газоконденсатных месторождений, как Оренбургское, Астраханское, Карачаганакское, расположенных в непосредственной близости от залежей каменной соли создавали условия для сооружения таких емкостей методами ядерно-взрывной технологии (рис. 30).

Подземные хранилища в полостях используются преимущественно для покрытия пиковых нагрузок в системе газоснабжения, поскольку могут эксплуатироваться в «рывковом» режиме с производительностью отбора, на порядок превышающей производительность отбора из подземных хранилищ в пористых породах. Наличие парка полостных хранилищ в каменной соли имеет большое значение в условиях рыночной экономики, так как легковосполняемые запасы компенсируют краткосрочные колебания газопотребления, предотвращают финансовые потери за дисбаланс в поставках газа из-за аварий на газопроводах, создают возможность планирования закупки газа на региональном уровне с учетом колебаний цен.

Технология создания подземных емкостей в каменной соли методом размыва разработана и используется на практике [35]. Первые хранилища общим объемом до 150 тыс. м³ газа были созданы в 1968 году на Аванском участке Приереванского соленосного района. Подземное хранилище успешно выдержало испытание на прочность во время Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г.

Создание подземных хранилищ методом размыва требует длительной и дорогостоящей подготовки, наличия источников пресной воды, варианты использования или захоронения больших объемов рассолов и пр. В этом отношении метод ядерно-взрывной технологии имеет преимущества, но одновременно существуют и

осложнения, связанные с постоянным радиационным контролем хранимой продукции и наблюдениями за состоянием полости.

Результаты комплексного изучения взрывов на площадке «Галит» позволили в 1970 году провести первый промышленный взрыв вблизи Оренбургского газоконденсатного месторождения для создания полости-хранилища в каменной соли (табл. 35).

Таблица 35. Промышленные ядерные взрывы для создания полостей-хранилищ на Оренбургском газоконденсатном месторождении [73, 87].

Дата проведения, индекс взрыва	Место проведения	Глубина заложения, м	Мощность взрыва, кт ТЭ	Состояние и объем образовавшейся полости
25.06.1970 Магистраль, Е-1	Оренбургская обл., участок Совхозное	702	2,3	Сухая полость объемом ~8,4 тыс. м ³
22.10.1971 Сапфир, Е-2	Оренбургская область, участок Дедуровка	1140	15	Сухая полость объемом ~33 тыс. м ³
30.09.1973 Сапфир, Е-3	Оренбургская область, участок Дедуровка	1145	10	Сухая полость объемом ~30 тыс. м ³

Взрыв Е-1 (объект «Магистраль») произведен на территории Октябрьского района Оренбургской области в 70 км на северо-восток от г. Оренбурга (рис. 30). Участок проведения взрывов Е-2 и Е-3 (объект «Сапфир») находится в 40 км на юго-запад от г. Оренбурга в 10-12 км от сел Дедуровка, Никольское, Нижняя Павловка.

Оренбургское газоконденсатное месторождение расположено в пределах Волго-Уральского соленосного бассейна нижнепермского возраста – кунгурский ярус 275-270 млн. лет. По структурно-тектоническим характеристикам – это предуральский прогиб в зоне южных отрогов Оренбургского вала. В пределах предуральского прогиба соленосные отложения выделяются в составе иренского горизонта кунгурского яруса [35]. Они представлены переслаивающейся толщей каменной соли и терригенно-хемогенных пород глин, мергелей, песчаников, ангидритов. В районе Оренбурга солевые прослои составляют 50-90% иренского горизонта, их мощность достигает 800 м. Каменная соль среднекристаллическая с пропластками ангидритов и глин.

Дедуровское солянокупольное поднятие (объект «Сапфир») в своей сводовой части по изогипсе «–800 м» имеет размеры 3 x 12 км. Абсолютные отметки кровли каменной соли на южном крыле солянокупольного поднятия находились в пределах 100-500 м. Для сооружения емкостей выбран соляной пласт мощностью от 400 до 600 м. Каменная соль среднезернистая, содержит примеси ангидрита, доломита, глинистых минералов и полигалита. Общее содержание примесей варьирует от 5 до 1% масс. Емкости Е-2 и Е-3 создавались вдоль меридиана на расстоянии 2,2 км друг от друга.

По результатам изучения экспериментальных взрывов на площадке «Галит» при взрывах на объектах «Магистраль» и «Сапфир» образуются полости, в которых основная часть продуктов деления и остатки делящихся изотопов будут находиться в донной линзе переплавленной соли, частично перекрытой обломками навала надполостной ореольной зоны. Закачка в полости газоконденсата приведет к его контакту с радиоактивной каменной солью граничной и ореольной зоны взрыва.

Существует потенциальная опасность загрязнения газоконденсата, реальность которой может быть подтверждена только опытным путем. Предварительные лабораторные эксперименты показали малую вероятность загрязнения, однако для опытно-промышленного внедрения ядерно-взрывной технологии были необходимы натурные крупномасштабные исследования.

Контроль и анализ хранимого в полостях газоконденсата, радиоэкологические условия на площадках скважин Е-1, Е-2 и Е-3 осуществлялись Радиевым институтом им. В.Г.Хлопина. Было установлено, что длительное хранение газового конденсата, контактирующего с загрязненной каменной солью и накапливающимся на дне полости радиоактивным рассолом, не приводят к загрязнению продукции свыше допустимых норм (табл. 36).

Таблица 36. Уровни загрязнения газоконденсата при длительном хранении в полостях-хранилищах Е-1, Е-2 и Е-3 [87]

Параметры	Радионуклиды				
	^3H	^{137}Cs	^{90}Sr	^{125}Sb	^{106}Ru
Объемное содержание в газоконденсате, Ки/л	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Предельно допустимая концентрация, Ки/л*	$5,4 \cdot 10^{-4}$	$8,1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$

* Приведены значения временно разработанных допустимых концентраций техногенных радионуклидов в газоконденсате, доступном в дальнейшем для бытового использования.

Проведенные исследования показали, что неполное обезвоживание газоконденсата приводит к растворению стенок полости и накоплению на ее дне радиоактивного рассола с концентрациями ^{137}Cs менее 10^{-5} Бк/л и следовыми количествами ^{90}Sr и трития [73]. Загрязнение газоконденсата могло произойти только в случае эмульгирования рассола. Для исключения такой возможности был разработан контролируемый режим отбора конденсата с периодической откачкой и захоронением накопленного рассола в случае его присутствия в полости-хранилище.

В период эксплуатации подземных хранилищ потенциально опасным являлся процесс «выдачи» из полостей хранимого газоконденсата. Для непрерывного контроля за выходящей из полостей-хранилищ продукцией была создана, смонтирована и сдана в эксплуатацию установка «Орел». Гамма-релейная установка перекрывала выдачу газоконденсата из полости-хранилища в случае превышения установленного порога объемной концентрации ^{137}Cs .

В ходе длительных наблюдений за переработкой газового конденсата на Оренбургском газоперерабатывающем заводе превышения фоновых значений уровней техногенной радиоактивности на трассе перекачки продукта и в «карманах» не отмечено. Все обнаруженные аномалии были связаны с хорошо известными процессами образования и накопления на внутренних поверхностях заводского оборудования труднорастворимых соединений природного радия [134].

В 1974 г. емкости Е-2 и Е-3 были подключены к крупному Оренбургскому комплексу производящему около 50 млрд. м³ газа в год [87].

Рабочее давление в полостях-хранилищах составляло от 80 до 140 атм. Подземный вариант хранения и выдержки газоконденсата позволил применить «безна-

сосный» вариант перекачки газоконденсата, используя для этого существующее пластовое давление попутных газов (рис. 61).

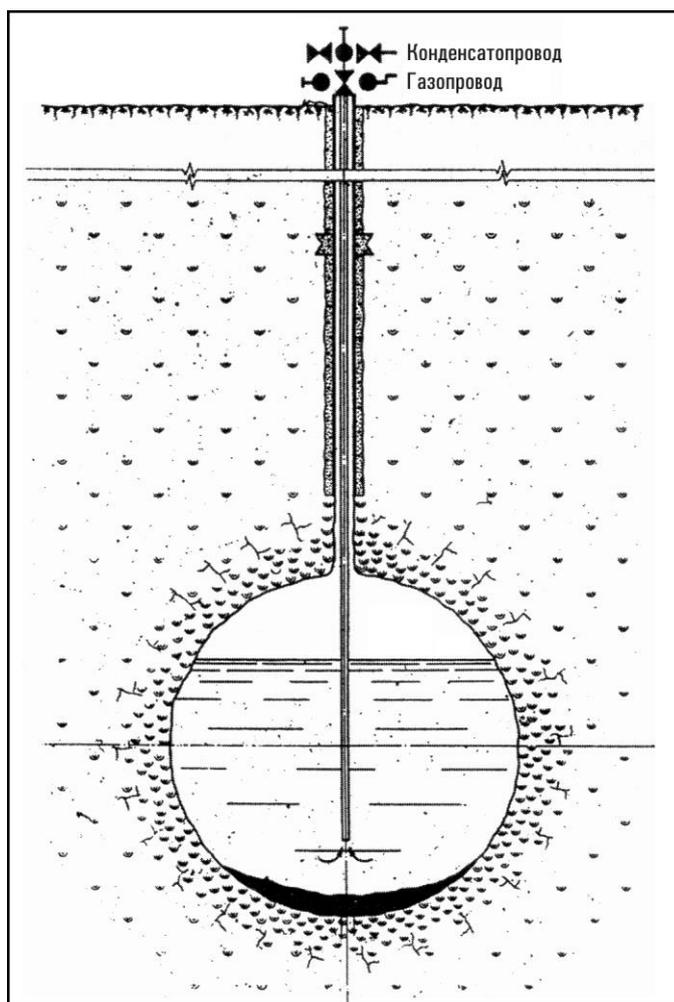


Рис. 61. Общий вид подземной полости-хранилища для газоконденсата [87].

В ходе проведения работ на объектах «Магистраль» и «Сапфир» были получены научно-технические данные, определяющие возможности использования ядерно-взрывной технологии создания в каменной соли полостей-хранилищ газоконденсата [87]:

- доказана возможность длительного хранения без регистрируемых утечек в полостях-хранилищ газоконденсата при пиковых давлениях до 14 МПа (140 атм);
- созданные ядерными взрывами полости-хранилища могут использоваться не только для хранения, но и для промышленной подготовки газа и конденсата;
- многолетние наблюдения показали отсутствие значимого радиоактивного загрязнения газоконденсата и технические возможности радиационного контроля качества поступающей из полостей продукции;
- показана возможность применения безопасной схемы эксплуатации емкостей через восстановленную технологическую (зарядную) скважину с использованием природного газа для выдавливания газоконденсата;
- подтверждена эффективность использования ядерно-взрывной технологии по таким параметрам, как удельные капиталовложения, удельная металлоемкость, продолжительность строительства.

Существенно, что на объекте «Сапфир» в течение 20 лет активно эксплуатировались геотехнологические системы, основные компоненты которых – полости-хранилища – сохраняли свои основные изолирующие свойства. Сами полости находились в мощной толще соляных пород, являющихся региональным экраном для Оренбургского газоконденсатного месторождения [135]. Каменная соль кунгурского яруса нижней перми в течение ~ 270 млн. лет находится в состоянии гидрогеологической «закрытости». При этом за время геологического развития крупного региона происходили сложные дислокации соляных формаций, связанные с тектоническими структурами Предуральяского прогиба. Установлено, что в условиях интенсивной дислокации соленосных толщ деформации и нарушения сплошности пород носят локальный, ограниченный характер. В непосредственной близости от крупных надвиговых структур сохраняются недеформированные, залегающие горизонтально пласты каменной соли. Эти особенности соляной тектоники региона позволяют прогнозировать длительную стабильность условий подземной изоляции долгоживущих техногенных радионуклидов на участках размещения подземных емкостей Е-1, Е-2 и Е-3.

При сохранении геолого-тектонических условий региона основным каналом миграции радионуклидов из полостей-хранилищ являются технологические скважины, по которым может проникать на поверхность образующийся радиоактивный рассол. По истечении ресурса времени использования подземных хранилищ надежная ликвидация этого канала является первоочередной задачей обеспечения радиационной безопасности объекта в целом. В настоящее время разработаны различные способы ликвидации подземных полостей в каменной соли с надежной изоляцией радиоактивных растворов от водоносных горизонтов и земной поверхности [136].

В 1999 г. на основании «Положения по консервации и ликвидации объектов ядерной взрывной технологии» (1993 г.) была выведена из эксплуатации емкость Е-1 (объект «Магистраль»). Причина остановки использования полости-хранилища – сверхнормативное накопление радиоактивного рассола, около 3,5 тыс. м³. Для ликвидации полости ее пустое пространство было заполнено песком, после чего из скважины поднята технологическая колонна. Затем в скважину подавалась крупнокристаллическая каменная соль и нагнетался под давлением ~ 3 атм. при температуре 250°С водяной пар. После этой операции буровой колонной соль уплотнялась, а верхняя свободная часть скважины цементировалась. Работы по закрытию емкости Е-1 показали высокую надежность используемой технологии, позволяющей учесть все требования радиоэкологии [87].

Радиоэкологические требования распространяются не только на подземную, но и на наземную часть технологических площадок. Во время пуско-наладочных испытаний и ввода в промышленную эксплуатацию полостей-хранилищ возникали нештатные ситуации, сопровождающиеся выносом на поверхность радиоактивного рассола. На площадках Е-2 и Е-3 значительная часть таких рассолов сжигалась в специальных амбарах.

В наблюдаемой зоне технологических площадок сотрудниками Радиевого института им. В.Г. Хлопина проводились систематические радиоэкологические исследования, изучались пробы почв, растений и водоемов, проводилась съемка мощности гамма-излучения (табл. 37, 38). За пределами ограждения площадок объекта «Сапфир» радиоактивность почвенно-растительного покрова находилась в пределах колебания фона, обусловленного глобальными выпадениями. Исключе-

ния составляют отдельные техногенные пятна, которые позднее были дезактивированы. Емкость Е-3 выведена из эксплуатации в конце 1995 г. Емкость Е-2 по состоянию на 1997 г. частично заполнена рассолом и газоконденсатом.

Табл. 37. Радиоактивность объектов внешней среды на площадке Е-2 в 1991 г. [75].

Место отбора	Расстояние от скв. Е-2, м	Дата отбора	Мощность дозы, мкР/ч	Удельная активность	
				почвы, Бк/кг	растительности на кг сырой массы, Бк/кг
Площадка		11.07.91	75	840	390
Север	250	11.07.91	22	840	370
Восток	250	11.07.91	42	1300	360
Юг	250	11.07.91	50	630	330
Запад	250	11.07.91	25	840	240
Среднее значение				880	340

Табл. 38. Радиоактивность объектов внешней среды на площадке Е-3 в 1991 г. [75].

Место отбора	Расстояние от скв. Е-3, м	Дата отбора	Мощность дозы, мкР/ч	Удельная активность	
				почвы, Бк/кг	растительности на кг сырой массы, Бк/кг
Площадка		12.07.91	400	4000	400
Север	250	12.07.91	60	1700	190
Восток	250	12.07.91	80	1700	210
Юг	250	12.07.91	20	840	350
Запад	250	12.07.91	70	1500	360
Среднее значение				1400	300

Необходимо отметить, что по данным Комплексного отчета о состоянии окружающей среды Оренбургской области за 2010 год для Оренбургского района загрязнение почвы ^{137}Cs варьировало в пределах 6500-4200 Бк/м², ^{90}Sr – 4100-3200 Бк/м².

В 1996-1997 гг. площадки объекта «Сапфир» были дезактивированы и рекультивированы, созданы хранилища низкоактивных грунтов. Средняя мощность дозы на площадках составляет 15-20 мкР/час, максимальная – не превышает 30 мкР/час. Для обеих площадок оформлены санитарные паспорта [75].

В 2007 году объекты «Магистраль» и «Сапфир» переданы в ООО «Подземгазпром» для выполнения на них изоляционно-ликвидационных мероприятий в соответствии с «Целевой программой работ по охране окружающей среды на радиационно-опасных объектах ОАО «Газпром» на 2005-2010 годы» [137].

Огороженная территория санитарно-защитной зоны объекта «Магистраль» занимает площадь 2,6 га. Емкость Е-1 изолирована от дневной поверхности цементным мостом и специальной засыпкой скважины. В санитарно-защитной зоне находятся 4 приповерхностных хранилища твердых низкоактивных отходов.

Огороженная санитарно-защитная зона вокруг скважины Е-2 составляет 6,7 га, вокруг скважины Е-3 – 7,6 га. В зоне скважины Е-2 находится приповерхностное хранилище низкоактивных грунтов и бетонное хранилище твердых РАО.

Емкость Е-2 изолирована от поверхности цементным мостом и специальной засыпкой скважины.

По данным радиационного контроля, проведенного Лабораторией радиационного контроля ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Оренбургской области» в 2012 г., мощность дозы излучения на объектах «Магистраль» и «Сапфир» не превышает 0,3 мкЗв/час (30 мкР/час). Радиоактивное загрязнение почвы на объектах обусловлено присутствием ^{137}Cs и составляет 320-360 Бк/кг [137]. Учитывая удаленность населенных пунктов (не менее 30 км) и отсутствие постоянно работающего персонала на промплощадках – эти объекты являются безопасными для населения области и полностью подконтрольны. Какие-либо горные, вскрышные или землеобрабатывающие работы в пределах санитарно-защитных зон запрещены.

7. Астраханское газоконденсатное месторождение. Объект «Вега»

Астраханское газоконденсатное месторождение расположено в юго-западной части Прикаспийской низменности в Астраханской области в 60 км северо-восточнее областного центра г. Астрахани. Месторождение открыто в августе 1976 года, а в 1987 г. начата его опытно-промышленная эксплуатация. Размеры залежи углеводородов 40×100 км, глубина залегания ~ 4 100 м. Промышленное скопление углеводородов приурочено к центральной, наиболее приподнятой части Астраханского свода [138]. Продуктивными являются карбонатные отложения среднего карбона. Характерны участки с аномально высокими пластовыми давлениями – до 63 МПа (~ 630 атм.). Месторождение перекрыто нижнепермскими глинисто-карбонатными отложениями и сульфатно-галогенными породами нижнепермского кунгурского яруса.

Астраханское месторождение одно из крупнейших в России с запасам газа в 2500 млрд. м³ и 400 млн. т газоконденсата. Последний содержит значительные количества сероводорода – до 26%, что первоначально ориентировало создаваемый газоперерабатывающий завод на выпуск серы, но одновременно осложняло эксплуатацию месторождения и создавало проблемы хранения сырья в металлических емкостях [75].

Интенсивное развитие в стране в конце 60-х годов газонефтяной отрасли потребовало расширения резервуарного парка. Известные традиционные способы строительства резервуаров не позволяли быстро удовлетворить спрос на емкости-хранилища высокого давления. В рамках программы мирного использования подземных ядерных взрывов было начато сооружение полостей-хранилищ на трех крупнейших газоконденсатных месторождениях – Оренбургском (объекты «Магистраль» и «Сапфир»), Астраханском (объект «Вега») и на Карачаганакском (объект «Лира»). Ко времени их сооружения на площадке «Галит» были проведены все экспериментальные исследования по отработке технологии и регламентов создания полостей-хранилищ в каменной соли [87].

Для создания полостей-хранилищ методом ядерно-взрывной технологии на Астраханском газоконденсатном месторождении была выбрана Сеитовская солянокупольная структура. По своим особенностям структуру следует относить к валлообразному поднятию с крутыми бортами и сложной тектоникой [139].

Соляное поднятие располагается в узле разрывных нарушений пород подсолевого комплекса, активизирующих и контролирующих пространственное распре-

деление соляных масс – процесс галокинеза. Для всего района Астраханского свода разрывные нарушения рассекают породы подсолевого комплекса под соляными валами и грабенами, но заканчиваются по восстанию в краевых частях компенсационных мульд. Эти нарушения являлись, по-видимому, подводными каналами для углеводородов. Однако благоприятные для накопления газа и газоконденсата условия создались только после отложения в кунгурское время мощной толщи соленосных пород. Именно соленосные формации являются региональной покрывкой, через которую миграция углеводородов крайне ограничена [140].

По динамическим условиям Сеитовская структура расположена в активной неотектонической зоне Астраханского свода. В результате бокового горизонтального давления с юга на север соляные массы региона были деформированы и приобрели вытянутые формы северо-восточного простирания с высокими уровнями горизонтальных напряжений. При более спокойном тектоническом режиме происходит плавное выдавливание соляных масс с образованием сравнительно изометрических «спокойных» куполов, таких, как Большой Азгир. Наиболее мощные подвижки солевых масс начались на границе триаса и перми, около 250 млн. лет назад. Возобновление активности образовавшихся куполов произошло на границе юры и мела (~ 145 млн. лет назад), а также в начале неогена (~ 20 млн. лет назад). Наиболее поздние подвижки соленосных структур установлены в плиоцене, около 2-3 млн. лет назад.

Оценка современных движений соляных структур на фоне региональных разнофазовых передвижений вмещающих пород является сложной задачей, поскольку крупные массивы каменной соли могут отражать только их «запаздывание» при региональном опускании синеклизы в целом. Для косвенных оценок возможно использование структурно-геологических и геоморфологических признаков. В частности, Сеитовское, Айдикское, Сары-Сорское и Досангское соляные поднятия образуют кольцевую мегаструктуру куполов и гряд в центральной части левобережья Астраханского свода. Эта кольцевая структура обрамляет крупную мульду с абсолютными отметками пород среднего карбона на глубинах 4000-4100 м. На отдельных участках этой депрессии каменная соль почти полностью выжата и породы надсолевого комплекса залегают непосредственно на подсолевых породах, т.е. питающий солевой пласт практически исчерпан [141]. Это в сочетании с крутопадающими, стенообразными формами склонов соляных тел дает основание для заключения о завершении стадии роста Сеитовской структуры.

Можно использовать и местные геоморфологические признаки. Прикаспийская низменность является областью всеобщего погружения, представленной в современном рельефе слабо наклоненной на юг равниной с абсолютными отметками от +50 м до –28 м. Активные купола, как правило, приурочены к участкам с относительными превышениями над остальной территорией. Скопления неактивных куполов расположены в районах с относительно пониженными значениями абсолютных высот. Абсолютные отметки устьев скважин объекта «Вега» лежат в диапазоне от –16 до 18 м, т.е. могут косвенно свидетельствовать об отсутствии активности соляной структуры.

По изогипсе минус 900 м общая длина Сеитовской структуры составляет около 20 км, ширина – до 3,5 км (рис. 62).

Основной минерал – галит, среднезернистый, на отдельных участках гигантозернистый. Примесный минерал – ангидрит, представленный призматическими кристаллами размером 0,1-0,2мм. Среднее содержание ангидрита – 6,4 % масс, но в

отдельных интервалах его количество достигает 20% масс. В породе присутствуют карбонаты и глинистые минералы в общих количествах менее 1% масс. Химический состав пород для скважины 5-7 приведен в табл. 39.

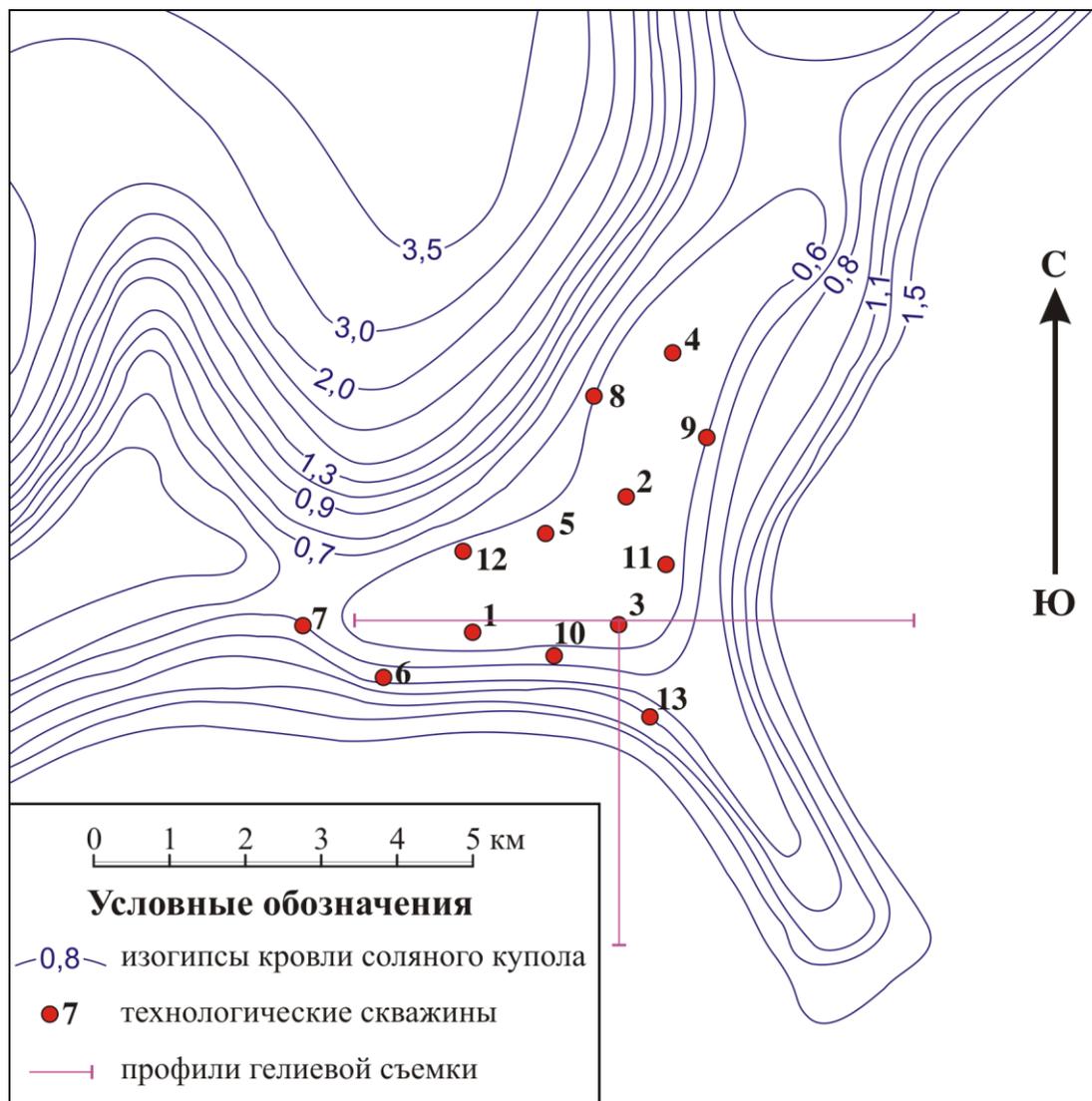


Рис. 62. Расположение технологических скважин на участке Сеитовской соляной структуры [113].

Химический состав каменной соли других скважин в интервале кровля – глубина заложения заряда близок к приведенным данным таблицы 39. Содержания галита варьируют в пределах 82-98 % масс., ангидрита – от 2-х до 11 % масс. В керновых образцах скважины 10-Т обнаружены включения мелких кристаллов сильвина (~ 0,1 мм). Гигроскопическая влажность варьирует от 0,02 до 0,12%. По результатам изучения разведочной скважины 1-РТ общая пористость каменной соли составляет 1,8%, открытая пористость – 1,5%.

Первичная горизонтально-слоистая структура осадков солеродного бассейна полностью трансформирована. В процессе галокинеза сульфатно-галитовые породы были интенсивно дислоцированы с образованием сложных складчатых структур и разрывом первичных прослоев ангидрита. Ангидрит в породах Сеитовской структуры присутствует обычно в виде линз, складчатых или разорванных, дефор-

мированных прослоев, образуя в целом сравнительно однородную по составу и структуре смешанную породу.

Таблица 39. Химический состав соляных пород скважины 5-Г (массовая доля, %)

Глубина отбора проб, м	SiO ₂ ×10 ²	Fe ₂ O ₃ ×10 ²	Al ₂ O ₃ ×10 ²	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
853	2,0	1,15	1,13	0,85	0,03	38,3	59,4	1,71
860	1,6	0,25	1,09	0,73	0,02	38,5	59,8	1,29
866	0,78	1,34	0,21	0,82	0,02	38,2	59,4	1,57
1044	3,2	1,17	4,68	0,98	0,03	38,0	58,9	2,04
1049	0,27	0,10	0,22	0,56	0,01	38,7	60,1	0,96
1055	7,3	1,66	3,32	0,94	0,02	38,1	59,1	1,92
1062	5,3	2,50	1,17	0,96	0,02	38,0	59,2	1,80
1068	5,9	1,35	2,78	0,90	0,02	38,3	59,3	1,76

В процессе бурения разведочных и технологических скважин по солевому массиву пройдено ~ 7 000 м. Приток рассолов был зафиксирован в скв. №№ 7-Г и 11-Г и был связан с прослоями терригенных и сульфатно-терригенных пород. Общая протяженность насыщенных рассолами пород 74 м, что по отношению к общей длине разбуренных пород составляет около 1%.

Полученные предварительные данные позволяли считать соляной массив на участке проведения взрывов однородным.

Характерной особенностью каменной соли Сеитовской структуры является повсеместное присутствие межкристаллических газово-жидких включений (см. раздел 1.5.1, рис. 15, 16). По обилию развития межкристаллических включений каменная соль из разведочных и технологических скважин Сеитовской структуры отличалась от изученных ранее галитовых пород Большого Азгира, Оренбургского региона, солей Иркутского амфитеатра, солянокупольной формации Верра (Германия), пластовой формации Соладо (США) и др. Первоначально, на этапе выбора площадки для строительства подземных полостей-хранилищ, на это крайне важное свойство галитовых пород, определяющее их способность к течению, конвергенции (заплыванию) подземных горных выработок не было обращено должного внимания [142].

Ранее уже отмечалось, что присутствие и морфология межкристаллических включений связаны с развитием тектонических явлений и галокинезом [50]. Ослабленные зоны в каменной соли должны сопровождаться активным образованием включений на границах кристаллов галита, слиянию изолированных вакуолей в капилляры, а затем и более крупные полости (рис. 63). Развитие процесса может привести к образованию соляных «сыпучек» и потенциальных каналов миграции углеводородов. Стабилизация тектонического режима способствует обратному процессу – разделению крупных полостей-вакуолей на мелкие изолированные включения [50].



Рис. 63. Объединение изолированных жидких включений в капилляры. Сеитовская соляная структура. Увелич. 27 раз.

Постоянное присутствие крупных газовой-жидких межкристаллических включений потенциально подготавливает массивы соляных пород к перемещению, поскольку контакты кристаллов галита ослаблены наличием газовой-жидкой прослойки, на долю которой может приходиться более трети поверхности соприкосновения твердой кристаллической фазы (рис. 64).

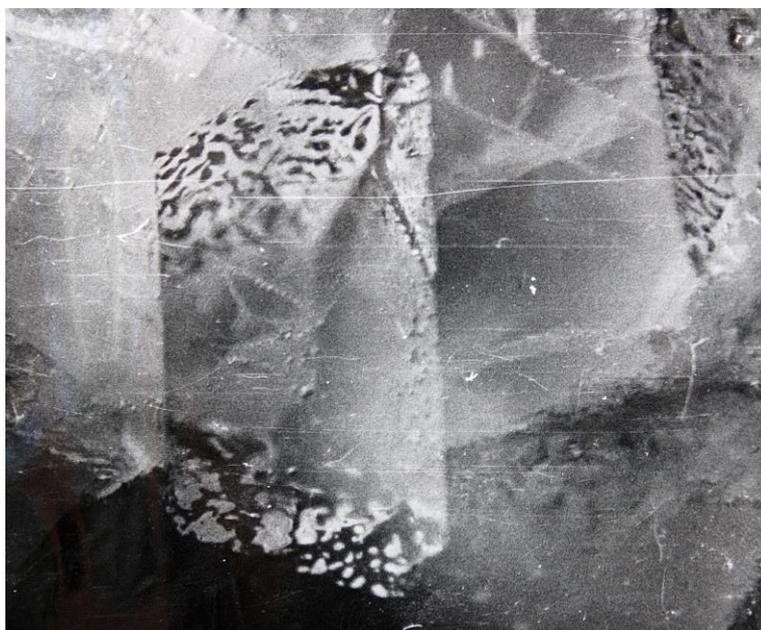


Рис. 64. развитие крупных газовой-жидких включений в контактной зоне кристаллов галита. Сеитовская соляная структура. Увелич. 17 раз.

В каменной соли Сеитовской структуры в разрезах, перпендикулярных контакту кристаллов галита, межкристаллические включения образуют узкую щель шириной 10-20 мкм, и длиной до 400 мкм. В плоскости контакта межкристаллические каналы имеют сложную извилистую форму с меняющимися очертаниями и размерами (рис. 15). Объем газов включений, выделяемых после растворения об-

разцов, составляет (1,1-2,3) см³/кг. Основные компоненты – диоксид углерода – 66% и азот – 23%. В жидкой фазе включений присутствуют ионы калия, магния и сульфат-ион.

В жидких включениях каменной соли Сеитовской структуры (скв. Лиманская № 3) в интервале 1389-1506 м ультрамикрочимическими анализами установлены следующие компоненты [50]: калий – от 4,7 до 22,4 г/л; магний – от 28,0 до 41,0 г/л; сульфат-ион – от 11,3 до 26,4 г/л.

Происхождение межкристаллических газовой-жидких включений, как и внутрикристаллических замкнутых включений-вакуолей, обычно связывают с захватом формирующейся эвапоритовой породой материнской рапы с растворенными в ней газами. Имея недостаточно хорошую изолированность, в них впоследствии может происходить перераспределение первичных компонентов, вплоть до полной смены первичного раствора и газов. Информация об условиях первичной кристаллизации пород, полученная по составу газовой-жидких включений, может быть искажена. Однако, именно эти включения представляют интерес в качестве свидетелей поздних, наложенных на галитовые породы процессов [50].

В образцах керна массивных солевых пород скорости движения рассолов крайне низкие [52]. Слой однородной каменной соли мощностью 100 м в условиях стабильности геологической среды обеспечивает изоляцию несорбирующихся радионуклидов в течение почти миллиона лет. Результаты лабораторных экспериментов на образцах каменной соли Сеитовской структуры не выходили за пределы уже имеющихся параметров миграции рассолов с радиоактивными трассерами – $n \cdot 10^{-7}$ м/сут при гидравлическом градиенте 0,01 м/м. При этом необходимо учесть, что лабораторный эксперимент дает максимальную величину этого параметра, поскольку проводится при отсутствии литостатической нагрузки, которая существенно уменьшает проницаемость каменной соли [143]. Полученные в лабораторных экспериментах количественные оценки свидетельствуют о преобладании диффузионного механизма миграции. Однако, исследования основных миграционных каналов – межкристаллических включений – показали их сложную конфигурацию со сменой величины сечений и фаз. При таких варьирующих условиях процессы миграции определяются совокупностью нескольких факторов, включающих кроме диффузии гравитационные эффекты, сопровождающие лабораторные эксперименты, капиллярные эффекты и перенос примесей по тонким пленкам рассола на границах с газовыми включениями и пр.

Программа сооружения полостей-хранилищ на Астраханском газоконденсатном месторождении планировала проведение 13 подземных ядерных взрывов на сравнительно небольшом участке Сеитовской соляной структуры. Технология и проект создания резервуаров разрабатывались специалистами ВНИПИпромтехнологии, площадка строительства выбиралась совместно с представителями заказчика Всесоюзным научно-исследовательским институтом ВНИИПРОМГАЗ.

Условия создания полостей-хранилищ предоставляли широкие возможности для проведения комплексных исследований влияния техногенного фактора на геологическую среду – апикальную часть соляной структуры и ее геолого-гидрогеологическое окружение. Опытно-промышленный статус создания полостей-хранилищ на Астраханском месторождении исключал извлечение на поверхность радиоактивных продуктов взрыва. Поэтому при разработке и планировании научного сопровождения производственно-технической программы в качестве основного направления были приняты газовой-геохимические исследования, позволя-

ющие получить разнообразную информацию, в том числе по результатам натуральных испытаний на различных этапах создания полостей-хранилищ [111, 113, 142]. Одним из обоснований выделенного научного направления явилось наличие в Радиовом институте им. В.Г. Хлопина квалифицированных специалистов, имеющих соответствующую газово-аналитическую аппаратуру. Кроме того, к началу работ на объекте «Вега» (1980 г.) сотрудники института приобрели опыт проведения газового пробоотбора на площадке «Галит» и на объектах «Магистраль» и «Сапфир».

На подготовительном этапе на образцах каменной соли Сеитовской структуры были получены данные по составу газов, выделяющихся при нагревании (табл. 40). Для образцов галитовых пород Сеитовской структуры масс-пирометрическим методом получены характеристики кинетики выделения основных газов при нагревании. Для сравнения аналогичные анализы проведены для Карачаганакского соляного купола и пластовой залежи каменной соли формации Саладо на участке сооружения хранилища «WIPP» (табл. 41).

Таблица 40. Состав газов, выделяющихся при плавлении каменной соли

№№ скважин	Общее к-во, см ³ /Г	Объемные доли, %				
		CO ₂	N ₂	CH ₄	CO	H ₂
1-Г	420	92,6	0,2	0,8	1,6	0,6
2-Г	345	86,9	0,3	0,6	2,3	1,4
2-Г	320	97,3	0,3	0,3	1,7	1,0
2-Г	348	94,1	0,7	0,6	3,6	1,3
2-Г	324	95,7	0,9	0,4	2,1	0,9
8-Г	318	97,2	1,3	0,1	1,4	
9-Г	405	95,8	3,6	0,1	0,5	
Среднее	350	94	1,0	0,4	1,8	1,0

Таблица 41. Интервалы температур максимального выделения газовых компонентов из каменной соли при нагревании по данным масс-пирометрического анализа

Компоненты	Интервалы температур максимального выделения, °С		
	Сеитовская структура	Карачаганакский купол	Формация Саладо, хранилище «WIPP»
H ₂ O	470-520	460-530	390-430
CO ₂	570-810	530-800	440-790
CH ₄	520-780	500-600	430-720
H ₂	590-780	530-800	310-680
CO	360-810	670-810	310-680
N ₂	590-810	630-810	760-800
SO ₂	800-810	430-810	810
H ₂ S	530-810	480-790	810
O ₂	770-810	560	430-810

Для каменной соли Сеитовской структуры определен состав газов газожидких включений, которые можно выделить из породы при растворении или при нагреве до температуры декрипитации замкнутых внутрикристаллических вакуолей (330-360°C). Общее количество газовых включений по сравнению с объемами газов, выделяющихся при нагревании, крайне мало, и составляет $(2-34) \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{г}$. Но их основными составляющими являются те же диоксид углерода, азот и метан.

Образцы каменной соли Сеитовской структуры, полученные при разбуривании 13-ти технологических скважин, были использованы для постановки экспериментов, позволяющих оценить информативность калий-аргонового отношения, или используемого в публикациях термина «калий-аргоновая возрастная метка» [58].

Первые определения «возрастной метки» были проведены на 13 пробах каменной соли, отобранных по разрезу разведочной скважины 1-Р в интервале глубин 781-1266 м. Проведенные в стандартных условиях анализы показали, что содержание ^{40}Ar , начиная с глубины 900 м до 1100 м, уменьшается от 10,0 до 1,1%, а на глубине 1172 м радиогенный аргон отсутствует. Однако глубже, в интервале 1200-1266 м, ^{40}Ar идентифицируется снова. Возможной причиной полной потери радиогенного аргона первоначально рассматривались аномально высокие геотермические условия Сеитовской структуры.

Средняя величина температуры каменной соли на глубине 1000 м составляла около 53°, но для центральной части соляного вала на этой же глубине температура возрастала до 57,9 °С (скв. 1-Т) и 58,2 °С (скв. 7-Т). Ближе к склону соляной структуры температура несколько снижалась: 45,2 °С в скважине 12-Т и 48,9 °С в скважине 8-Т (рис. 65).

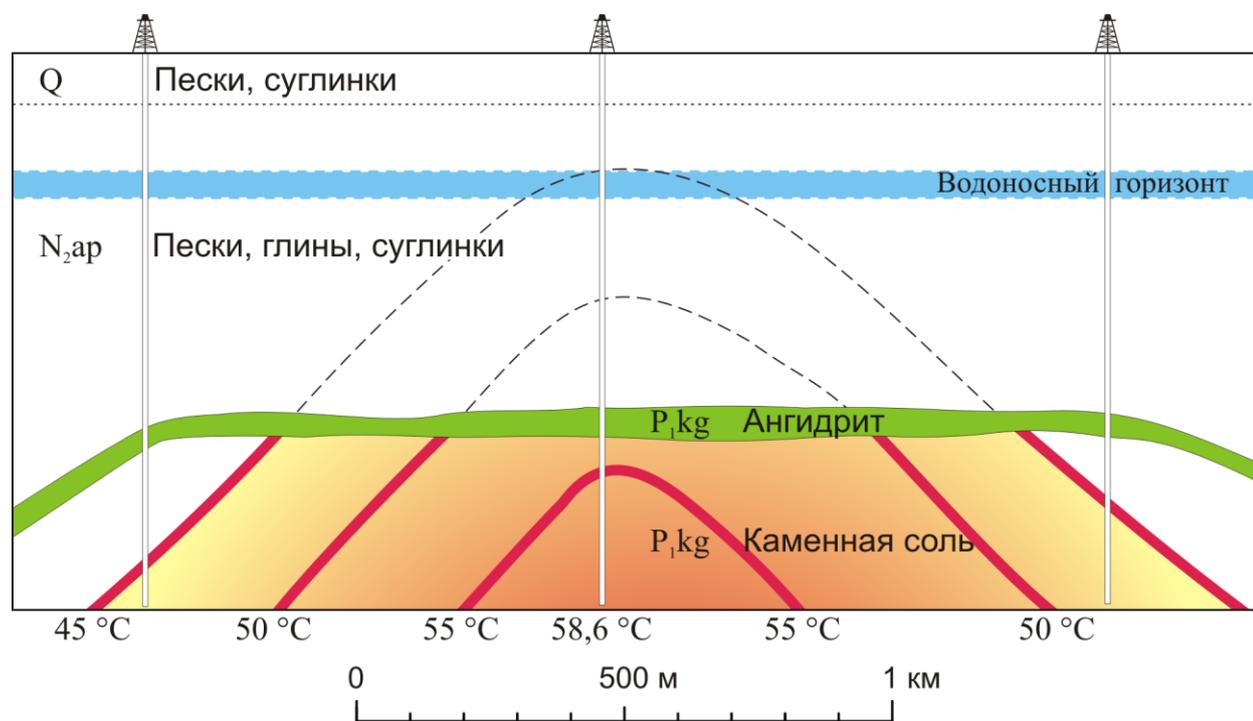


Рис. 65. Геотермические условия центральной части Сеитовской соляной структуры [113].

Высокая теплопроводность каменной соли ($6,1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{°C}^{-1}$) по сравнению с вмещающими осадочными породами (глины $1,7 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{°C}^{-1}$) нарушает распределение литосферного теплового потока. Он концентрируется в массивах солей, создавая над апикальными частями куполов и в их прибортовых частях резкие аномалии, на 50-60% превышающие фоновый тепловой поток для данного региона [144]. Это одна из главных особенностей распределения геотермического поля в солянокупольных бассейнах. Одновременно зоны повышенных температур в недрах осадочных пород связаны с проявлениями нефтегазоносности. Сохранению образующихся залежей углеводородов способствует их «запечатывание» пластическими массами каменной соли, усиливающимися это свойство при повышении температуры. Аномальный тепловой поток способствует залечиванию нарушений сплошности среды и сохранению газовых компонентов в соляных массивах. При этом рост давления уже на глубине 1 км снижает газопроницаемость каменной соли до уровня газупора [33].

Разброс «возрастных меток» для проб из разведочной скважины 1-Р мог быть связан с большими методическими погрешностями, обусловленными низкими содержаниями и крайне неравномерным распределением по данным автордиографий в каменной соли калия, а также возможностью локальной миграции радиогенного аргона в газовой-жидкие включения. С целью повышения надежности аналитических данных были разработаны варианты и выделены оптимальные методические приемы для лабораторных опытов. В частности, для определения калия использовались пробы переплавленной соли после выделения из них аргона. Масса таких проб составляла не менее 0,2 кг, и она выделялась после усреднения каменной соли по всему интервалу пробоотбора, т.е. по длине керна.

Учитывая возможность перемещения радиогенного аргона из минералов в газовой-жидкие включения, для анализа использовались различающиеся по крупности классы каменной соли – 2-3 см и < 1 см, различные пробы, отобранные по вертикальному разрезу, пробы для одной глубины из различных скважин и т.д. Из более чем 70 анализов были исключены данные с высокими погрешностями определения радиогенного аргона (> 20 %). Выборка наиболее представительных по различным критериям 20 проб представлена в таблице 42.

Установлено, что содержание радиогенного аргона не зависит от размеров частиц каменной соли, взятой для анализа. «Возрастные метки» для отдельных проб варьируют от 80 до 660 млн. лет. Определенный интерес представляет усреднение всех аналитических данных, показывающих формальный «средний возраст» породы, который соответствует 260 млн. лет, что весьма близко к истинному возрасту материнского нижнепермского пласта каменной соли – 270-275 млн. лет.

Полученные для Сеитовской структуры «возрастные метки» не претендуют на какие-либо абсолютные или реперные уровни изотопной геохронологии, однако эти данные позволяют сделать заключение о закрытости соляных пород всей структуры для системы $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ в течение сотен миллионов лет.

Для дополнительной оценки закрытости рабочего блока каменной соли объекта «Вега» следует рассмотреть усредненные значения для 70 проанализированных проб, сделав выборки по интервалам пробоотбора и по крупности анализируемых частиц (табл. 43). Для сравнения в таблице приведены усредненные данные для разведочной скважины 1-Р.

Таблица 42. «Возрастные метки» калий-аргонового метода для проб каменной соли, отобранных из различных технологических скважин Сеитовской структуры [113].

Скважина №	Глубина, м	Размер частиц в пробе, см	K, 10 ⁻³ %	⁴⁰ Ar, 10 ⁻⁸ см ³ /г	«Возрастная метка», млн. лет
3	670–710	2–3	4,6	6,3	330
3	670–710	<1	4,0	4,3	260
3	850–900	2–3	3,2	3,7	290
3	850–900	<1	3,5	3,7	260
4	760–800	2–3	6,2	6,5	260
4	760–800	<1	3,1	9,7	660
5	770–779	2–3	1,8	3,5	430
5	770–779	<1	4,4	1,2	70
5	869–877	2–3	7,3	4,1	140
5	869–877	<1	9,7	3,5	90
5	978–982	2–3	12,0	18,0	350
5	978–982	<1	12,0	10,0	200
5	1068–1081	2–3	7,1	4,8	170
5	1068–1081	<1	12,0	3,8	80
5	846–859	2–3	13,0	17,0	300
5	846–859	<1	11,0	14,0	300
7	760–800	2–3	6,0	12,0	460
7	760–800	<1	5,4	12,0	500
8	690–710	2–3	2,6	0,7	80
8	690–710	<1	2,9	1,0	90
Среднее:			6,6	7,0	260 (нижняя пермь)

Таблица 43. Усредненные данные содержания аргона в каменной соли рабочего блока объекта «Вега».

Вариант опробования	Суммарный Ar, 10 ⁻⁶ см ³ /г	Доля ⁴⁰ Ar, %	Среднее содержание ⁴⁰ Ar в пробах, 10 ⁻⁸ см ³ /г	Вариации содержания ⁴⁰ Ar в пробах, 10 ⁻⁸ см ³ /г
Выборки по всем технологическим скважинам (из 70 проб):				
– интервал 1,0-1,2 км	2,2	2,6	4,0	0,5 – 13,3
– класс < 1 см	1,5	4,4	6,1	1,0 – 14,1
– класс 2,0-3,0 см	2,4	2,8	6,9	0,6 – 17,6
Все пробы скв. 1-Р	1,9	5,0	4,7	1,8 – 13,0

Для всех проб вариации содержания ⁴⁰Ar находятся в пределах от 0,5 до 10,3 %. При этом доля ⁴⁰Ar в суммарном аргоне лежит в сравнительно небольшом интервале величин – 2,6 - 5,0 %. Среднее содержание ⁴⁰Ar для проб различных выборок лежит в интервале от 4,0·10⁻⁸ до 6,9·10⁻⁸ см³/г. Эти величины с учетом погрешно-

стей можно считать идентичными. Следует обратить внимание на близкие значения в усредненных пробах граничных величин вариаций содержания ^{40}Ar : минимальные – $0,5 \cdot 10^{-8}$ и $1,8 \cdot 10^{-8}$; максимальные – $13,0 \cdot 10^{-8}$ и $17,6 \cdot 10^{-8}$ см³/г.

Эти данные свидетельствуют в большей степени о равномерности распределения ^{40}Ar в рабочем блоке каменной соли объекта «Вега», чем о неравномерности его распределения. При этом ^{40}Ar может находиться как в структуре калиевых минералов, так и в газовой-жидких включениях.

При разбуривании технологических скважин в каменной соли Аксарайской структуры были встречены внутрiformационные рассолы с минерализацией 318 г/л. По скважине 7-Т приток рассола получен в интервале 1118-1132 м с дебитом 0,75 м³/сут. По скважине 11-Т – в интервале 974-1034 м с дебитом около 0,07 м³/сут. Внутрисолевыми рассолами считаются маточной рапой, остающейся в прослоях и линзах, изолированных в кунгурских соляных породах [145].

Общая площадь, которую занимают все 13 рабочих площадок объекта «Вега», составляет около 10 км² (рис. 62). По данным разбуривания технологических скважин эту часть соляного кряжа можно рассматривать как плоскую поверхность в интервале глубин 683-806 м.

Каменная соль перекрыта пластом ангидритовых пород мощностью 44-84 м. На отдельных участках встречаются вкрапления или прослои гипса. Это – кепрок, время образования которого считается пермским.

Ангидритовый кепрок перекрыт карбонатно-аргиллитовыми породами, которые условно относят к пермо-триасу. В нижней части осадочных отложений этого возраста преобладают известняки и мергели, мощность которых по технологической скважине 1-Т составила 38 м. С этими породами связаны хлоридно-кальциевые рассолы с общей минерализацией 220-250 г/л. Высокие содержания брома (350-500 мг/л) и йода (10-37 мг/л) свидетельствуют о закрытом характере надсолевых вод. Дебит по данным скважины 1-Т составил менее 1 м³/сут.

Известняки и мергели перекрыты плотными, местами трещиноватыми аргиллитами, которые представляют первый, наиболее глубокий водоупор над соляным массивом [139] (рис. 66). Суммарная мощность карбонатно-аргиллитовых пород верхней перми (или пермо-триаса) варьирует от 48 до 100 м.

Верхнепермские породы перекрыты песчано-глинистыми отложениями неогена, которые представлены акчагыльскими глинами с прослоями песков и апшеронскими глинами с прослоями песков и песчаников. Эти осадочные отложения двух морских трансгрессий Пра-Каспия (рис. 60) известны по геологическому описанию площадки «Галит».

Суммарная мощность песчано-глинистых пород неогена на площади «Вега» лежит в пределах 450-500 м. К апшеронским пескам приурочен наиболее мощный водоносный горизонт неогеновых пород на глубине 250-300 м. Минерализованные воды (28,5-30,1 г/л) горизонта использовались при бурении технологических скважин, вследствие чего вблизи скважин 1-Т, 2-Т, 3-Т и т.д. располагались скважины технического водоснабжения – 1-В, 2-В, 3-В и т.д. Воды апшеронского горизонта напорные, и в зависимости от гипсометрической отметки устья скважины уровни воды в них находятся на глубине 2,6 м (скв. 11-В), или происходит слабый самоизлив вод (скв. 1-В, 3-В, 4-В, 10-В, 13-В). Дебит самоизливающихся скважин достигает 14,6 м³/час (скв. 1-В). Воды хлоридно-натриевые с температурой от 17,5 до 25,0°C. На скважинах 1-В, 3-В, 4-В отмечены выходы метана.

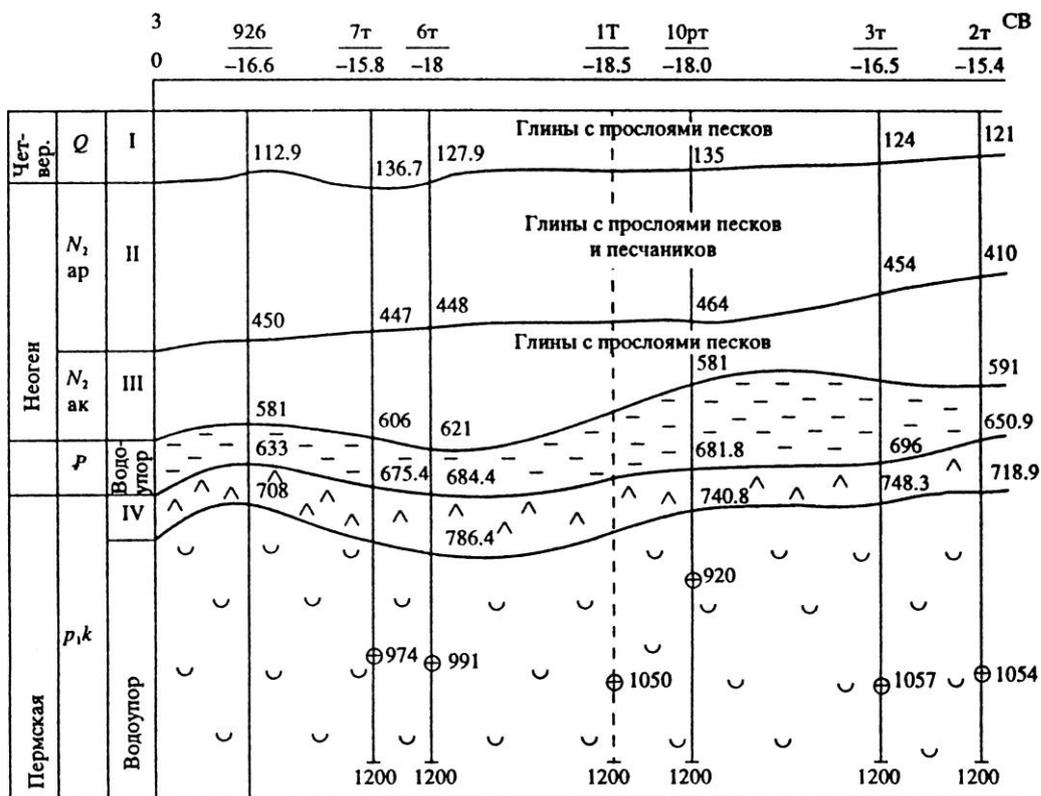


Рис. 66. Схематический геологический разрез запад – северо-восток центральной части Сеитовской структуры (от скв. 7-Т к скв. 2-Т). Под номерами скважин указаны абсолютные отметки их устья. По скважинам отмечены границы разделов разновозрастных и различных по составу пород, глубина заложения зарядов и предельная глубина разбуривания скважин [139]:

1 – глины; 2 – ангидриты; 3 – каменная соль.

I – четвертичные породы хазарского яруса; II – верхний неоген, апшеронский горизонт; III – верхний неоген, акчагыльский горизонт; IV – пермь, кунгурский горизонт.

Барьерные свойства неогеновых монтмориллонит-хлорит-каолинитовых глин рассмотрены ранее для площадки «Галит». Отмечалось, что в минерализованных хлоридно-натриевых водах коэффициенты распределения для ^{137}Cs (350-370 г/см³) и ^{239}Pu (10³-10⁴г/см³) такие же, как в пресных водах, но для ^{90}Sr снижаются до единицы. Естественно, что мощная песчано-глинистая толща неогена является природным барьером не только для солевой формации, но и для техногенных радионуклидов, инъецированных в каменную соль после проведения серии подземных ядерных взрывов.

Отложения неогена перекрыты суглинками и песками четвертичного возраста хазарского горизонта. Это отложения одной из позднейших трансгрессий Пракаспия, широко развитой на территории Прикаспийской низменности. С песками Хазарского времени связан водоносный горизонт с глубиной залегания в интервале 20-40 м. Воды хлоридно-натриевые, с общей минерализацией 28,1-37,7 г/л, т.е. близки по составу с водами апшеронского горизонта. Однако, в отличие от последнего, в водах хазарского горизонта присутствует сульфат-ион – до 7,8 г/л. Сульфатные воды, как известно, являются природным барьером для стронция, поскольку

ку последний способен образовывать труднорастворимые сульфаты типа минерала целестина $\text{Sr}[\text{SO}_4]$.

На отдельных участках территории объекта «Вега» на глубинах до 15 м выявлены локальные водопроявления, связанные с линзами песков Хвалынского яруса.

Для оценки Сеитовской структуры как геологической среды, в которой будет создан парк подземных полостей-хранилищ, были привлечены различные специализированные организации. По заданию ВНИИПромтехнологии территория площадки «Вега» была обследована Космоаэрогеологической экспедицией № 1 ПГО «Аэрогеология» Мингео СССР. Проведенные исследования показали, что Сеитовская соляная структура расположена в активной зоне Астраханского свода. Существует боковое горизонтальное давление с юга на север, в результате которого соляные массы были раздавлены и приобрели узкие вытянутые формы северо-восточного простирания с аномально высоким уровнем горизонтальных напряжений, в том числе и на участке сооружения хранилищ методом ядерно-взрывной технологии. Исходя из региональных неотектонических особенностей площадка «Вега» оценивалась как малоблагоприятная.

После проведения геолого-геофизических работ и разбуривания разведочных скважин специалистами ВНИИПРОМГАЗ и ВНИИПромтехнологии, были выявлены пониженная прочность и повышенная ползучесть каменной соли Сеитовской структуры в условиях аномальных геотермических температур каменной соли на глубинах заложения зарядов [139].

Однако, все существующие сомнения не смогли противостоять крайней необходимости создания парка подземных резервуаров для быстрого ввода в эксплуатацию крупнейшего в стране Астраханского газоконденсатного месторождения. По условиям сейсмобезопасности взрывы должны быть проведены до начала сооружения основных объектов газоперерабатывающего завода.

Тринадцать подземных емкостей создавались в течение 1980-1983 годов четырьмя сериями: 1980 г. – одна емкость 1-Т; 1981 г. – две емкости 2-Т и 4-Т; 1982 г. – четыре емкости: 7-Т, 6-Т, 5-Т, 3-Т; 1983 г. – шесть емкостей: 9-Т, 8-Т, 11-Т, 13-Т, 10-Т, 12-Т. В трех последних сериях подрыв ядерных зарядов осуществлялся последовательно с разрывом во времени в 5 мин. Это исключало взаимодействие зарядов друг с другом. Расстояние между зарядами было более 1000 м и только в одном случае, между скважиной 1-Т и 10-Т, составило 800 м. Для 12-ти взрывов использовались тарированные ядерные заряды мощностью по 8,5 кт, и только одна емкость 3-Т была создана при использовании заряда мощностью 13,5 кт по ТЭ [139]. Взрывы проводились на глубине от 920 до 1100 м. Конструкция скважин и их забивка обеспечивали полную камуфлетность.

Неоднозначная оценка Сеитовской структуры требовала получение дополнительных данных, определяющих, в первую очередь, структурно-тектонические особенности соляного массива. Для выявления разломов и зон нарушений сплошности среды была использована водно-гелиевая съемка территории, на которой были размещены все 13 технологических скважин. Гелиевая съемка позволяет установить связь между концентрациями гелия в приповерхностных частях литосферы и в глубинных проницаемых разломах [146]. В поле литосферного потока гелия консолидированные слабопроницаемые блоки горных пород выделяются пониженными значениями концентраций инертного газа – менее 10^{-3} мл/л. Зоны разломов с повышенной тектонической активностью проявлены в поле гелия высокими кон-

центрациями, достигающими более 0,1 мл/л. Наиболее стабильные результаты могут быть получены при проведении измерений концентрации гелия в водных пробах водоносных горизонтов. Установлено, что над солевыми породами, перекрывающими крупные газоконденсатные месторождения (Оренбургское, Шебелинское), концентрации гелия минимальные, что связано с перекрытием восходящих глубинных потоков гелия солевыми газонепроницаемыми экранами.

Измерения гелия на площадке «Вега» осуществлялись анализатором мембранного типа ИНГЕМ-1, разработанным во Всесоюзном научно-исследовательском институте минерального сырья (г. Москва). Чувствительность прибора составляла $2,9 \cdot 10^{-6}$ об. %. Гелиевая съемка проводилась группой специалистов, в состав которой входили сотрудники Радиевого института им. В.Г.Хлопина, ВНИИПромгаза и Всесоюзного научно-исследовательского института минерального сырья.

Для усиления эффекта газовыделения по предполагаемым ослабленным зонам при проведении исследований использовалось ударно-сейсмическое воздействие серии шести подземных ядерных взрывов, проведенных 24 сентября 1983 года. Пробы отбирались по двум водоносным горизонтам – апшеронскому в интервале глубин 250-300 м и хазарскому в интервале глубин 20-25 м (рис. 62).

Начальные измерения выполнены в сентябре 1983 года за 7-10 суток до проведения серии ядерных взрывов. Последующие измерения начали проводиться через 5 часов после последнего взрыва в скважине 12-Т и продолжались в течение двух суток с повторным опробованием и контрольными замерами по отдельным скважинам технического водоснабжения. Выяснилось, что уплотнение пород вблизи скважин, в которых были проведены взрывы, вызвало ранее не наблюдавшийся самоизлив скважин 9-В и 12-В.

Послевзрывное сдавливание и уплотнение грунтов вблизи технологических скважин было известно ранее по наблюдениям радиационных дозоров на объекте «Галит». Подъем к поверхности и истечение грунтовых вод зарегистрированы после взрыва А-П. Временное увеличение экспозиционной дозы вблизи технологических скважины (до 0,2 мР/ч), связанное с выдавливанием радона после сейсмического удара и уплотнения грунта, наблюдалось для большинства взрывов, проведенных на объектах «Галит», «Сапфир» и «Вега». Прискважинные аномалии регистрировались обычно в течение одного-полтора часов после взрыва.

Результаты проведенных гелиометрических исследований приведены в табл. 44. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- в подземных водах апшеронского горизонта до проведения серии взрывов установлены крайне низкие концентрации гелия – $(6,0 \pm 0,6) \cdot 10^{-5}$ % об., которые характерны для районов развития однородных газонепроницаемых пород;
- после серии взрывов в апшеронском водоносном горизонте концентрации гелия не изменились, однако увеличился разброс данных для отдельных скважин со средним содержанием по горизонту – $(5,9 \pm 1,6) \cdot 10^{-5}$ % об.;
- как и ожидалось, более высокие концентрации и разброс экспериментальных данных получены для приповерхностных вод хазарского горизонта, однако и эти данные с максимальными значениями $3,2 \cdot 10^{-4}$ % об. меньше величин, определяющих наличие проницаемых зон;
- максимальные концентрации гелия в водах хазарского горизонта наблюдаются над крутыми склонами соляной структуры (меридиональный профиль), на тех

участках, где и следует ожидать нарушение сплошности вмещающих осадочных пород восходящими массами каменной соли.

Таблица 44. Результаты гелиометрических исследований на объекте «Вега» [113]

Апшеронский водоносный горизонт			Хазарский водоносный горизонт		
№№ скв.	Концентрация гелия, 10 ⁻⁵ об. %		№№ скв.	Концентрация гелия, 10 ⁻⁵ %	
	До взрывов	После взрывов		До взрывов	После взрывов
2-В	7,0	7,0	1	7,6	12,6
3-В	6,5	3,0	2	3,6	15,8
4-В	5,7	4,6	3	21,6	18,2
5-В	5,6	6,2	4	2,2	3,7
7-В	6,0	9,1	5	2,8	6,0
9-В	4,9	5,6	6	7,6	15,9
10-В	6,2	5,7	7	8,9	9,3
11-В	6,2	6,8	8	13,1	3,6
12-В	6,1	4,8	9	9,4	7,3
13-В	5,4	6,6	10	9,9	7,8
			Меридиональный профиль		
			12	2,5	1,8
			13	12,6	14,4
			14	2,2	13,6
			15	20,5	20,1
			16	24,0	25,5
			17	14,4	23,4
			18	14,7	27,6
			19	7,0	11,4
			20	14,2	18,0
			21	32,2	30,7
Средние значения	6,0 ± 0,6	5,9 ± 1,6	Средние значения	11,6 (2,2 – 32,2)*	14,3 (1,8 – 30,7)

* в скобках приведены крайние значения объемных концентраций гелия.

Высококчувствительная водно-гелиевая съемка, проведенная после неоднократных ударно-сейсмических воздействий на породы кровли Сеитовской соляной структуры, не выявила в пределах территории строительства подземных резервуаров проницаемых зон миграции подвижного инертного газа.

Гелиевая съемка не охватила локальный участок Сеитовской структуры на северо-западном склоне соляного вала вблизи скважины 8-Т, где предполагалось присутствие разрывного нарушения. Скважина технического водоснабжения здесь отсутствовала. Для выявления разрывного нарушения был использован эманационный метод, основанный на появлении газовых аномалий торона и радона на участках активных тектонических зон, в частности, на границах солянокупольных структур. В соответствии с рекомендациями от скважины 8-Т был разбит профиль по азимуту СЗ 283° длиной 1,7 км. По профилю были разбурены 10 шпуров глубиной 0,7 м, на забой которых помещались зонды с детекторами радона (нитроцел-

люлозная пленка LR-115) [147]. Экспозиция продолжалась 12 суток после взрыва. Полученные результаты и повторные контрольные замеры не выявили радоновых аномалий над предполагаемым разрывным нарушением.

В соответствии с технологическим регламентом подготовки полостей-хранилищ их вскрытие и стравливание паро-газовой смеси осуществляется не ранее трех месяцев после проведения взрыва (объект «Сапфир»). На этом этапе работ проводятся определения параметров полости и состава стравливаемых газов. Одновременно ведутся радиоэкологические исследования объектов внешней среды на территории расположения объекта. Минимальный срок вскрытия полостей на объекте «Вега» составил 8 месяцев, максимальный – 21 месяц (табл. 45). Давление на оголовках скважин после «прокола» обычно не превышало $6 \cdot 10^4$ Па, т.е. в полостях наблюдалось небольшое разрежение при нормальном атмосферном давлении $10 \cdot 10^4$ Па. Наблюдаемое разрежение прогнозировалось после изучения газоносности пород Сеитовской структуры, в которых основные газообразующие минералы – карбонаты – присутствуют в незначительных количествах. Одновременно, можно было сделать заключение о малой газопроницаемости массива в целом, об отсутствии на участках проведения взрывов проницаемых для газов разрывных нарушений или ослабленных зон.

По инициативе Радиевого института им. В.Г.Хлопина для определения объемов полостей и параметров заряда в несущие штанги взрывного устройства закладывались контейнеры с клатратным соединением инертного газа (^{129}Xe) в количествах до 100 л.

Первичное вскрытие полостей на объекте «Вега» показало, что их объемы варьируют в пределах 20-44 тыс. м³ и близки к расчетным. В полостях нет воды, а на приустьевых площадках – нормальная радиационная обстановка [139].

Стравливание газов из полостей проводилось через герметичное выкидное устройство, имеющее пробоотборно-измерительный участок и оснащенное запорной арматурой, задвижками, манометрами, отстойниками сконденсированной влаги и пр. Выкидное устройство имело в плане Т-образную форму и заканчивалось двумя вертикальными трубами (свечами) высотой 8-10 м, расположенными на расстояниях ~ 80 м друг от друга с целью уменьшения воздействия метеорологических условий на безопасность стравливания.

Основными компонентами стравливаемых газов являлись диоксид углерода (87,3-97,4 % об.), азот (до 5,0 % об.) (табл. 46).

Объемная доля кислорода составляла, как правило, менее 0,01 %, и его присутствие в больших количествах определяло представительность пробоотбора.

Наиболее опасными радиоактивными изотопами в стравливаемой смеси были тритий, йод-131 и сера-35. Последний изотоп образуется из присутствующего в каменной соли хлора-35 по реакции (n, p). Концентрация серы-35 в стравливаемом газе обычно не превышала 9 Бк/л.

Выход йода-131 на дневную поверхность был незначительным. В Радиевом институте им. В.Г.Хлопина была проведена оценка формирования газовой фазы в полостях камуфлетного ядерного взрыва в каменной соли. Установлено, что при температуре ~ 4000 К большая часть йода будет находиться в связанной форме с натрием. При конденсации паров и последующей кристаллизации испаренного галита иодид натрия входит в кристаллическую решетку хлористого натрия и прочно в ней удерживается [87].

Табл. 45. Технические данные по подземным резервуарам объекта «Вега» [139]

Параметры измерения	С к в а ж и н ы												
	1-Т	2-Т	3-Т	4-Т	5-Т	6-Т	7-Т	8-Т	9-Т	10-Т	11-Т	12-Т	13-Т
Дата создания, мес., год	09,80	09,81	10,82	09,81	10,82	10,82	10,82	09,83	09,83	09,83	09,83	09,83	09,83
Вскрытие, мес., год	07,82	10,82	04,84	02,83	09,84	10,83	05,84	06,84	08,84	11,84	12,84	02,85	09,84
Кровля полости, м	1031	1028	1043	1039	1080	968	947	1053	1031	912	898	1024	1056
Дно полости, м	1059	1059	1074	1064	1100	1004	978	1060	1057	944	930	1061	1086
Температура, °С	110	124	124	97	113	—	96	126	120	94	—	96	116

Таблица 46. Состав газов, стравливаемых из полостей объекта «Вега»

№№ скважин	Время после взрыва, сут	Объемная доля, %				
		CO ₂	N ₂	CH ₄	H ₂	CO
1-Т	650	89,8	1,75	0,64	5,2	≤ 0,01
2-Т	379	91,0	1,95	1,6	1,5	< 0,01
3-Т	528	87,3	0,41	0,30	1,31	< 0,01
6-Т	366	90,0	0,58	0,18	0,19	< 0,01
8-Т	254	91,0	5,0	0,17	0,61	< 0,01
9-Т	329	90,5	0,85	0,20	0,18	< 0,01
10-Т	424	94,5	0,90	0,19	0,04	< 0,01
12-Т	507	97,4	0,56	0,16	0,98	< 0,01
13-Т	397	92,0	1,03	0,21	0,19	< 0,01

Основная часть стравливаемого трития находилась в окисленной форме (НТО). Содержание этой формы трития в парогазовой смеси после проколов технологических скважин на объекте «Вега» приведено в табл. 47.

Таблица 47. Содержание трития в окисленной форме (НТО) в парогазовой смеси из некоторых полостей объекта «Вега» при проколах технологических скважин [87]

Взрыв	Дата отбора	Объемная активность, Бк/л
1-Т	19.07.1982 г.	$3,7 \cdot 10^4$
	20.07.1982 г.	$3,7 \cdot 10^5$
	23.07.1982 г.	$2,6 \cdot 10^5$
	24.07.1982 г.	$4,0 \cdot 10^5$
	26.07.1982 г.	$7,8 \cdot 10^4$
2-Т	08.10.1982 г.	$2,7 \cdot 10^6$
	09.10.1982 г.	$2,1 \cdot 10^9$
	18.10.1982 г.	$1,4 \cdot 10^9$
3-Т	29.03.1984 г.	$5,9 \cdot 10^4$
	30.03.1984 г.	$7,8 \cdot 10^4$
	01.04.1984 г.	$1,7 \cdot 10^6$

Увеличение содержания трития в процессе стравливания происходило в основном за счет повышения влагосодержания паро-газовой смеси. Значительная часть трития в окисленной форме из полости взрыва не выходила, поскольку непрогретая скважина играла роль «обратного холодильника» и не пропускала пары воды.

Во время стравливания парогазовой смеси мощность дозы гамма-излучения на техплощадках в среднем не превышала 1 мкГр/ч (100 мкР/ч) [87]. По завершению стравливания проводились радиоэкологические исследования объектов внешней среды санитарно-защитных зон. Отбирались и анализировались пробы почвы, растительности, вод открытых водоемов, воздушных выпадений. Установлено, что

содержание радионуклидов в объектах окружающей среды после проведения стравливания парогазовой смеси не изменилось и оставалось в пределах средне-квадратичных флуктуаций фоновых значений района.

В отдельных случаях во время стравливания в растительном покрове санитарно-защитной зоны площадок увеличивалось содержание трития (до 540 Бк/кг) и серы-35 (до 61 Бк/кг). Однако уже через 2-3 недели в этих же местах пробоотбора ранее регистрируемые радионуклиды не обнаруживались [87].

В процессе стравливания проведены исследования по определению «возрастной метки» соляного массива с использованием радиогенного аргона, присутствующего в полостной паро-газовой смеси.

При условиях полной камуфлетности ядерный взрыв в каменной соли можно рассматривать как крупномасштабное подобие лабораторных опытов по определению возраста калий-аргоновым методом. В лаборатории анализируемая порода с известным содержанием калия расплавляется до полного выделения газов (~900°C). В выделившихся газах после очистки определяются количества аргона, в котором затем устанавливается доля ^{40}Ar .

При взрыве происходит плавление значительных количеств каменной соли (~1000 т на одну кт мощности по ТЭ), а все выделившиеся при плавлении газы скапливаются в полости. При условиях ее надежной изоляции по количеству в полостных газах радиогенного аргона и содержанию калия в каменной соли в интервале испарения и плавления породы можно приближенно оценить «взрывную возрастную метку». Одновременно в случае «дефицита» ^{40}Ar оцениваются газоизолирующие свойства каменной соли на участке взрыва.

Ранее было установлено, что доля ^{40}Ar в суммарном аргоне из проб каменной соли Сеитовской структуры не превышает 5%. Для полостных газов эта величина достигает 26-27% (полость 10-Т и 13-Т). «Возрастные метки» крупномасштабного взрывного эксперимента, как правило, дают завышенные возрастные значения, достигающие до 4,5 млрд. лет.

Очевидно, что ошибки могут быть связаны с некорректностью переноса содержания калия в килограммовых количествах проб керна из интервала заложения заряда на всю массу переплавленной соли (~9 000 т). Однако вариации этой величины для нескольких десятков проб из 13 скважин лежат в сравнительно небольшом интервале $(1,8-13,0) \cdot 10^{-3} \%$. Использование средних величин $6,6 \cdot 10^{-3} \%$ не исправляет явно завышенные «возрастные метки».

Исходя из проведенных ранее изотопно-геохронологических исследований [111, 113], следует допустить миграцию ^{40}Ar в полость из вмещающего соляного массива. Этому способствовали зоны трещиноватости по контуру полостей, а также образующееся в полостях разрежение. Одновременно «возрастные метки» полостных газов подтверждают сделанное ранее заключение о том, что в каменной соли Сеитовской структуры значительная доля радиогенного аргона находится в свободном состоянии в межкристаллических газовой-жидких включениях. Наблюдаемое перераспределение ^{40}Ar в полостях взрывов может реализоваться лишь при условии закрытости соляной структуры как геологической системы для инертного газа.

Результаты проведенных газовой-геохимических исследований распределения и миграции аргона, гелия и радона свидетельствовали о достаточно высоких изолирующих свойствах каменной соли Сеитовской структуры на участке проведения подземных ядерных взрывов объекта «Вега».

Неожиданные результаты дало повторное обследование емкостей в 1984-1986 гг., которое показало значительное уменьшение их объемов. Для незаполненных газоконденсатом емкостей величина конвергенции составила до 40 % начального объема. Эти данные не соответствовали расчетным и резко отличались от наблюдений, полученных при создании подземных емкостей в других соляных массивах на тех же глубинах, в которых деформации не происходили в течение 15-20 лет [142]. Первое предположение было связать уменьшение объемов с их длительным нахождением без противодействия, поскольку полости в течение 6-7 лет не были заполнены газоконденсатом. Темпы сокращения подземных хранилищ, заполненных газоконденсатом, оказались существенно ниже. При этом на устье скважин заполненных емкостей 1-Т, 3-Т, 6-Т, 10-Т, 11-Т, 12-Т, 13-Т гидростатическое давление составило около 6 МПа, что свидетельствовало об их герметичности [139].

Для выяснения причин столь быстрой конвергенции («коллапсирования») в 1986 г. проведено повторное вскрытие хранилищ с отбором проб в их донной части. Требовалось определить, связано ли уменьшение объемов с обрушением надполостной зоны трещиноватости или же происходит затекание каменной соли к центру полости по ее контуру и сопровождается «поднятием» линзы переплавленной соли. По данным повторного разбуривания происходит изменение отметок кровли полости и дна. Например, в емкости 9-Т за 2 года и 8 месяцев кровля поднялась на 1 м, а дно – на 9 м. Объем полости уменьшился с 32 тыс. м³ до 9 тыс. м³. По данным ГП «Астраханьгазпром» в 1992 году, через 9 лет после взрыва отметка кровли поднялась на 16 м, а отметка дна – на 17 м. Объем полости составил всего 0,6 тыс. м³. Было отмечено, что пустое пространство начало обводняться [148].

При повторном разбуривании было получено небольшое количество проб из полостей 2-Т, 3-Т, 6-Т, 8-Т, 10-Т, 11-Т, 13-Т. Проведенные исследования установили, что во всех отобранных пробах присутствуют радиоактивные новообразования, которые по своим структурно-минералогическим особенностям и составу радионуклидов являются фрагментами внутренних и ореольных зон взрывов. В образцах внутренней зоны обнаружены характерные выделения «решетчатого» ангидрита из консолидированного расплава ангидрит-галитовой эвтектики (см. рис. 48). Из новообразованных минералов отмечены монтичеллит и мелкодисперсные частицы оксидов железа. К последним приурочены основные количества альфа-излучающего радионуклида – ²³⁹Pu. В отдельных образцах определены содержания ¹⁴⁴Ce, ¹⁵⁵Eu, ¹²⁵Sb, ¹⁰⁶Ru, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co. Наиболее представительными по наличию характерных новообразованных продуктов взрыва были пробы из полостей 3-Т и 6-Т. Содержание ¹⁴⁴Ce в отдельных образцах варьировало от 2·10⁶ до 2·10⁷ Бк/г на момент образования. Выделены образцы краевой зоны с содержанием ¹⁰⁶Ru до 1,2·10⁷ Бк/г на момент образования. Содержания ¹³⁷Cs в образцах каменной соли ореольной надполостной зоны варьировали от 0,9·10² до 1,4·10⁴ Бк/г на момент образования. В целом это были характерные твердые радиоактивные продукты взрыва, приведенного в каменной соли.

Был подтвержден процесс конвергенции созданной емкости по всему полостному контуру, т.е. не только опускания кровли полости, но и «поднятия» ее донной части с находящейся в ней линзой переплавленной соли. При этом применительно к воздействию на геологическую среду подземных ядерных взрывов следовало рассматривать не только известную пластичность и способность к конвергенции каменной соли, но и более широкий спектр деформаций, объединенный

термином реологические процессы. Последние определяют способность изменять во времени напряженно-деформированное состояние среды в поле действия механических сил. К основным реологическим свойствам горных пород относятся: упругость, пластичность, прочность, вязкость, ползучесть, релаксация напряжений [149].

Реологические свойства каменной соли Сеитовской структуры отличаются от аналогичных свойств каменной соли других объектов, где ядерными взрывами создавали полости-хранилища. Например, величина деформации ползучести почти в три раза выше. При этом сделанные расчеты показали, что при своевременном создании противодействия в емкостях на объекте «Вега» столь быстрой конвергенции не произошло [139]. Начальной причиной повышенной ползучести каменной соли является широкое развитие межкристаллических газовой-жидких включений.

Извлечение на поверхность радиоактивного материала явилось нештатной операцией для опытно-промышленного создания полостей-хранилищ. Ее осуществление связано с возможностью облучения персонала и радиоактивного загрязнения приустьевых частей технологических площадок. Извлечение радиоактивного керна на объекте «Вега» создавало на рабочих местах мощность дозы гамма-излучения до 20 мР/ч, а при отборе проб – до 200 мР/ч. Происходило загрязнение грунта, оборудования и спецодежды до $4 \cdot 10^4$ бета-частиц/см²·мин. Однако загрязнения были локальные и легко ликвидировались по опыту работ на площадке «Галит» [87].

В течение всего периода существования объекта «Вега» контроль и анализ радиозоологической обстановки осуществлялся сотрудниками Радиового института им. В.Г.Хлопина [75]. Радиоактивность окружающей среды в период 1980-1986 гг. соответствовала средним значениям, характерным для глобальных радиоактивных выпадений (табл. 48). В сферу наблюдений кроме 13 площадок Сеитовской структуры вошли две площадки дополнительных взрывов 14-Т и 15-Т, проведенные в октябре 1984 г. на Сарысайско-Айдикской соляной гряде. Для этих двух полостей быстрой конвергенции не наблюдалось, и они использовались как продувочные резервуары при освоении эксплуатационных скважин Астраханского газоконденсатного месторождения.

Проведение пробоотбора на объекте «Вега» совпало по времени с аварией на Чернобыльской АЭС. Аварийные выпадения, как отмечалось ранее, были однозначно зафиксированы при проведении мониторинга площадки «Галит» (см. главу 5.2). Эти же выпадения были зарегистрированы и в районе площадок объекта «Вега» во втором квартале 1986 года (табл. 48). В пробах золы растений были идентифицированы ранее не наблюдавшиеся ^{141,144}Ce, ^{103,106}Ru, ¹³⁴Cs, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb.

После аварии на ЧАЭС были проведены исследования воды из источников водоснабжения в поселках Селитерное и Аксарайский. Радиоактивных загрязнений не было обнаружено, содержания окисленной формы трития находились на фоновых уровнях (табл. 49).

В 1988 г. вследствие продолжающегося сокращения объемов полостей началось выдавливание из них радиоактивных рассолов, образовавшихся в результате нарушения герметичности скважин при повторных обследованиях и отборе проб. Нарастало трубное, затрубное и межколонное давление, и в конце 1991 г. на скважине 3-Т оно достигло 80 атм. Через задвижку фонтанной арматуры скважины 5-Т произошло истечение радиоактивного рассола, в котором содержание ¹³⁷Cs составляло $1 \cdot 10^4$ Бк/л. Произошло локальное загрязнение приустьевой площадки площа-

дью около 12 м². Аналогичные протечки и загрязнения наблюдались и на других площадках. Начались работы по дезактивации, сбору и локализации загрязненного грунта, ликвидации протечек.

Таблица 48. Радиоактивность проб почвенно-растительного покрова в районе объекта «Вега» [75]

Площадка отбора проб	К-во проб (точек отбора)	Мощность дозы, мкР/ч	Удельная активность, Бк/кг	
			Почвы	Растительности (сырого веса)
Отбор проб в течение 1980-1986 гг.				
1-Т	40	12-15	600	180
2-Т, 4-Т	76	12-15	850	265
3-Т, 6-Т, 7-Т	152	12-15	480	120
8-Т – 13-Т	230	–	580	180
14-Т, 15-Т	48	–	710	215
Отбор проб во втором квартале 1986 г.				
14-Т	20	15	550	2415
15-Т	20	15	550	1766

Таблица 49. Радиоактивность проб воды из рек Ахтуба и Бузан во II-м квартале 1986 г. [75]

Место отбора проб, река, поселок	Активность воды, Бк/л	Активность окисленной формы трития, Бк/мл
Ахтуба, п. Селитерное	0,18	0,28
Бузан, п. Аксарайский	0,10	0,28

Напорное выдавливание полостных рассолов по скважинам свидетельствовало о непроницаемости пород, вмещающих центральную зону взрыва. В противном случае при наличии крупных разрывных нарушений разгрузка находящихся под давлением растворов происходила в каменную соль или в перекрывающие соляной массив породы. Следовало допустить, что апикальная часть Сеитовской структуры сохранила свою монолитность и низкую проницаемость после проведения всех серий подземных ядерных взрывов [139]. Такую оценку подтверждали проведенные ранее гелиевая съемка и «возрастные метки» калий-аргонового метода, позволяющие сделать заключение о закрытости соляной структуры [113]. Нельзя было исключить, что при существующих высоких реологических свойствах каменной соли появившиеся разрывные нарушения должны были сравнительно быстро залечиваться.

Потеря 13 емкостей и дезактивационные работы на площадках объекта «Вега» привлекли к себе внимание различных научно-исследовательских и экологических организаций, не участвующих в подготовке, проектировании и проведении ядерных взрывов. С конца 80-х годов информация о программах мирного использования ядерно-взрывных технологий стала широко доступна для специалистов и общественности [150].

В частности, в 1991 г. Государственным геофизическим предприятием «Спецгеофизика» (п. Поваровка Московской обл.) проведены исследования по гео-

лого-экологической оценке Сеитовской (Утигенской) структуры. Авторами исследования представлен отчет, в котором отмечено, что по разным данным в подсолевом палеозое, солевой толще, надсолевом комплексе и современном рельефе Сеитовской структуры отмечены разрывные нарушения и зоны трещиноватости однотипного простирания, указывающие на их единство и общепланетарный характер. Наиболее разбита системой сообщающихся трещин присводовая часть купола на глубинах 1,0 – 1,8 км. Сквозные разломы субмеридионального простирания проходят по всей территории строительства подземных газохранилищ (рис. 67).



Рис. 67. Схема разломной тектоники на объекте «Вега» в Сеитовской (Утигенской) соляной структуре по данным ГГП «Спецгеофизика» (1992 г.). Линиями с цифрами выделены разломы и тектонические нарушения в пределах контура газохранилища.

Новые геофизические данные противоречили общеизвестным оценкам соляных пород как региональных флюидоупоров, обеспечивающих возможность накопления углеводородных залежей, а также как природных экранов и опорных газометрических горизонтов (см. раздел 1.1. Экранирующие свойства соленосных формаций). Известно, что в крупных соляных массивах разрывные нарушения отсутствуют [151] Какие-либо разломы на объекте «Вега» при выборе участка строительства полостей-хранилищ специалистами ВНИИПРОМГАЗ и ВНИИПромтехнологии не были зафиксированы. Отсутствие разрывных нарушений надсолевой толщи подтвердила гелиевая съемка, а повышение давления на оголовках технологических скважин после конвергенции полостей свидетельствовало в пользу монолитности соляного массива.

В начале 1993 года на имя Председателя Научного Совета РАН по проблемам биосферы академика А.Л.Яншина была представлена докладная записка «Последствия техногенной дестабилизации недр Астраханского газоконденсатного ме-

сторождения в зоне подземных ядерных взрывов». Изложенные в докладной записке материалы получили свое развитие в сводном заключении Экспертной комиссии Государственной экологической экспертизы Минприроды России по ТЭО «Закрытие подземных емкостей и ликвидация технологических скважин, обеспечивающих радиационную безопасность на длительный период времени, с выбором оптимальных решений (объект «Вега»)» от 23 марта 1994 года. Экспертное заключение подписали шесть докторов и двенадцать кандидатов наук различных учреждений РАН.

В представленных документах резко критиковались ядерно-взрывной метод создания полостей-хранилищ и ТЭО консервации емкостей на объекте «Вега» после их конвергенции. Затрагиваемые вопросы касались также фундаментальных знаний о соляных формациях. В частности, отмечалось, что проектанты «Веги» использовали «старые и неверные предпосылки о том, что каменная соль создает защитный барьер в силу своей непроницаемости и пластичности». Предлагалось создать на Астраханском газоконденсатном месторождении комплексный геоэкологический мониторинг, в сферу деятельности которого должны быть включены исследования по широкому кругу научных проблем. Предлагалось, например, дешифровать аэро- и космоснимки до и после взрывов, организовать наблюдения за вариациями напряженно-деформированного состояния соляного массива методами регистрации микросейсм в сочетании с прецизионными гравиметрическими и геодезическими наблюдениями, провести комплексные наблюдения за уровнями водных бассейнов Волги и Каспия, наблюдения за изменениями трасс перелетных птиц и пр. В значительно меньшей степени затрагивались вопросы стандартного радиоэкологического мониторинга, а также имеющаяся практика работ по дезактивации и рекультивации площадок проведения подземных ядерных взрывов.

По тексту докладной записки и сводного заключения авторы ставили своей целью глобальную экологическую защиту Нижнего Поволжья и сохранения ресурсного потенциала Астраханского газоконденсатного месторождения от техногенной дестабилизации всех природных комплексов, сохранение экологических и социальных систем после проведения взрывов на объекте «Вега».

В начале 90-х годов любая научная или научно-техническая проблема становилась политэкономической, поскольку в стране происходили коренные социально-политические изменения, переход к рыночной экономике, смена социально-экономической формации. Значительная часть научных кадров оказалась невостребованной по причине отсутствия Государственных программ и государственных заказов на интеллектуальную продукцию. Объект «Вега» привлек к себе внимание, возросшее до уровня радиофобии, после аварии на Чернобыльской АЭС. Последнее обстоятельство усугубило положение ученых, прилагающих титанические усилия для восстановления своей востребованности в рамках реализации крупного проекта по экологическому мониторингу.

К сожалению, несмотря на существующие многочисленные публикации, посвященные мирной программе использования ядерно-взрывных технологий, их радиационно-экологических последствиях для конкретных регионов, до настоящего времени различные экологические движения продолжают нагнетать обстановку вокруг ядерных взрывов, проведенных на территории бывшего Советского Союза. При этом имеющиеся фактические данные замалчиваются или грубо искажаются, ставя под сомнение их достоверность. Специалисты, принимавшие участие в разработках и проведении Программы мирного использования ядерных взрывов, вы-

нуждены были многократно выступать и публиковать данные с опровержениями и информацией о реальных оценках радиационной опасности [87, 93, 100, 113, 117, 139, 142, 152].

Неудача по созданию парка подземных хранилищ до настоящего времени привлекает внимание к объекту «Вега». При этом современный стиль подачи якобы научных данных, использующий броские заголовки устрашающего содержания, однозначно выделяет дезинформацию и домыслы заказных публикаций. Такие выступления отвлекают внимание населения, различные государственные и общественные организации от реально существующих экологических, социальных и других проблем конкретного региона. Для Астраханской области одной из таких проблем является обращение и захоронение бытовых отходов [153]. При этом условия Прикаспийской впадины, по мнению специалистов, не имеют альтернативы, и в качестве наиболее безопасной среды изоляции бытовых и промышленных отходов необходимо использовать солянокупольные структуры и генетически связанные с ними компенсационные мульды [154]. Проведенные исследования последних лет подтверждают высокие изолирующие свойства каменной соли и не поддерживают сомнения отдельных экспертов РАН в непроницаемости и пластичности галитовых пород. В частности, изучение соляных формаций западной оконечности Прикаспийской впадины (2001 г.) показало широкие возможности их использования в качестве депонирующей среды для хранения нефтепродуктов [155].

Обстановка, сложившаяся в начале 90-х годов на объекте «Вега», потребовала оперативного решения ряда научно-технических, экономических и радиационно-экологических вопросов всеми участниками проведения работ по Программе мирного использования ядерных взрывов [139, 142]. Потеря хранилищ для Астраханского комплекса была в малой степени возмещена созданием двух полостей в октябре 1984 г. на Сарысайско-Айдикской соляной гряде. Специалисты ВНИИ-промтехнологии и ВНИИПРОМГАЗ выясняли причины повышенной конвергенции емкостей и разработали варианты локализации и консервации радионуклидов – радиоактивных отходов ядерно-взрывной технологии.

В 1992 году в Астрахани создана Научно-испытательная станция (НИС) Радиевого института им. В.Г.Хлопина. Основная цель деятельности НИС заключалась в разработке и научном обосновании рекомендаций по обеспечению геомеханической стабилизации и экологической безопасности подземных хранилищ, созданных ядерными взрывами [156]. Для ее достижения использовались данные анализа всего процесса деформирования и разрушения полостей в соляном массиве, а также опыт проведения камуфлетных взрывов на других объектах. Обязательным и постоянным компонентом деятельности НИС являлся радиоэкологический мониторинг 13 площадок и скважин объекта «Вега», включая определения уровней загрязнения объектов внешней среды (рис. 68).

Была разработана концепция мониторинга, по результатам которого ежегодно представлялись отчеты НИС.

Начальный этап работ заключался в проведении анализа существующего опыта сооружения и эксплуатации подземных резервуаров, созданных камуфлетными ядерными взрывами в каменной соли. Затем по совокупности всей имеющейся информации требовалось оценить условия изоляции радионуклидов – радиоактивных отходов, образовавшихся при использовании ядерно-взрывной технологии на объекте «Вега» и реальные возможности дестабилизации недр подземными ядерными взрывами.

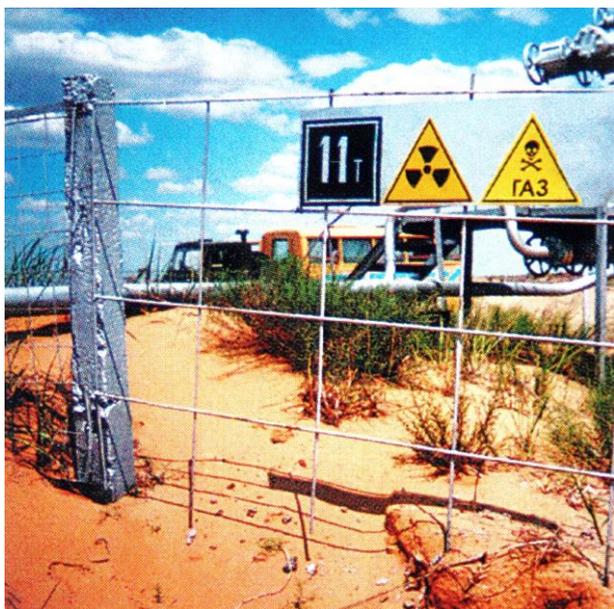


Рис. 68. Технологическая площадка под-земной емкости 11-Т, созданной с помощью ядерного взрыва на объекте «Вега», Астраханская область. Первоисточник: Радиевый институт им. В.Г. Хлопина. 80 лет. Буклет. С.-Петербург. 2002 г.

Горный отвод объекта «Вега» в каменной соли представляет кровлевую часть Сеитовской структуры на участке размещения всех 13-ти скважин площадью около 10 км² и мощностью ~ 500 м (интервал глубин от 700 до 1200 м). Объем соляного рабочего блока составляет ~ 5 км³, масса – ~ 1·10¹⁰ т. Количество радиоактивной переплавленной соли всех

скважин оценивается в ~ 1,2·10⁵ т, или 0,0012% по массе всего горного отвода. По оценкам 1994 года общее количество ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr, «захороненных» в каменной соли составляет ~ 6,4·10⁴ Ки, альфа-излучающих радионуклидов – ~ 380 Ки. Кроме твердых радиоактивных отходов присутствует неопределенное количество высокоминерализованных рассолов с содержаниями ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs и трития на уровнях низко- и среднеактивных отходов [142].

Анализ режима изменений давлений на скважинах свидетельствует об отсутствии гидроразрывов над полостями и позволяет считать, что миграция радионуклидов может происходить только через массив каменной соли [139]. Принимая наличие избыточного давления в емкостях до 20 МПа и средний коэффициент фильтрации для каменной соли до 10⁻⁸ м/сут, максимальное распространение фронта миграции таких подвижных радионуклидов как ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs за 300-500 лет не превысит 200-300 м. В крайнем случае, какое-то количество этих радионуклидов проникнет в ангидритовый кепрок, перекрытый водоупором аргиллитовых пород (рис. 66). Изотопы долгоживущих тугоплавких элементов, например ²³⁹Pu, удерживаются в переплавленной соли в форме новообразованных труднорастворимых минералов.

Аномальная текучесть каменной соли Сеитовской структуры связывается отдельными авторами с активизацией неотектонических процессов и возможностью изменения изолирующих свойств каменной соли [148]. Естественно, что в этом случае в качестве барьера на пути миграции радионуклидов следует рассматривать не только соляную толщу, но и слой акчагыльских глин верхнего неогена.

Акчагыльские отложения залегают со стратиграфическим несогласием на размытой поверхности пермских аргиллитов. На территории размещения технологических площадок глубина залегания кровли акчагыла 460-530 м, подошвы 580-650. Общая мощность песчано-глинистых пород 85-150 м. В основании разреза залегают базальные песчаники, конгломераты и пески. Выше – светло-серые, карбонатные глины с маломощными прослоями и линзами песков и алевролитов. В целом глинистая толща акчагыльских отложений является региональным водоупором, исключаящим переток нижезалегающих высокоминерализованных вод в водоносный вышезалегающий апшеронский горизонт [148].

Апшеронские отложения залегают с размывом на осадках кровли акчагыла. Мощность морских апшеронских отложений варьирует в пределах 290-340 м. Это глины с прослоями песков и песчаников, начинающиеся с глубин 120-140 м. Водоносный горизонт приурочен к прослоям разнородных песков и вскрыт скважинами технического водоснабжения. Воды хлоридно-натриевые с минерализацией 28,5-30,1 г/л. По водам апшеронского горизонта (интервал 250-300 м) проведена гелиевая съемка. Барьерные свойства неогеновых глин рассмотрены ранее. Было отмечено, что химическая среда насыщенных хлоридно-натриевых растворов практически не влияет на коэффициенты распределения ^{137}Cs и ^{239}Pu . Однако в этих условиях глины не являются барьером для ^{90}Sr .

Четвертичные образования представлены песчано-глинистыми отложениями последовательных трансгрессий Каспийского моря: нижнего плейстоцена (бакинский ярус), среднего плейстоцена (хазарский ярус), верхнего плейстоцена (хвалынский ярус) и современными отложениями. Мощность четвертичных отложений (глины, суглинки, супеси, пески) на территории объекта «Вега» от 105 до 120 м. По водоносному горизонту хазарского яруса в интервале глубин 20-25 м проведена гелиевая съемка по широтному и меридиональному профилю (табл. 62). Необходимо отметить присутствие в водах хазарского горизонта сульфат-иона, наличие которого может полностью исключить миграцию ^{90}Sr .

Современные отложения представлены эоловыми песками, создающими существующий рельеф местности. Рассматриваемая территория представляет равнину, осложненную многочисленными холмами и грядами песчаных барханов и межбарханых впадин, покрытых скудной растительностью. Это малонаселенный краевой участок песков Батпайсагыр. При среднегодовой температуре + 8,5°C, годовое количество осадков составляет 150-200 мм. Абсолютные отметки поверхности колеблются от -10 до -18 м.

В целом мощная песчано-глинистая толща неогена является долгосрочным природным барьером не только для сохранения легко растворимых галитовых пород, но и служит препятствием для миграции радионуклидов из более глубоко залегающей солевой формации.

Кроме сорбционно-изоляционного барьера глинистых пород на площадке «Вега», как и на других соляных структурах, присутствует гравитационно-устойчивая система подземных вод.

В рассматриваемых вариантах загрязнения подземных вод необходимо учитывать, что воды апшеронского или хазарского горизонта – это хлоридно-натриевые растворы или рассолы, непригодные для питья.

Проведенные газово-геохимические исследования [111, 113] не выявили разрывных нарушений в пределах участка проведения взрывов и дают основания считать изученную часть Сеитовской соляной структуры как закрытую.

Очевидно, что такой закрытости способствуют высокие пластичные свойства среды, повышенные скорости конвергенции каменной соли. Эта же способность обеспечивает «запечатывание» радиоактивных отходов взрывных полостей в апикальной части Сеитовской структуры. Геологические условия объекта «Вега» позволяют оценивать локализацию техногенных радионуклидов как надежную.

После анализа причин сокращения объемов подземных емкостей специалистами ВНИИПТта был сделан вывод о локализации зон разрушения в каменной соли после проведения подземных взрывов [139]. По экспериментальным и расчет-

ным данным заполнение полостей и прекращение самоподдерживающегося режима их разрушения должно прекратиться через 35-45 месяцев после взрыва.

В настоящее время извлечь радиоактивные отходы ядерно-взрывных технологий на объекте «Вега» не представляется возможным. Наиболее реальным перспективным мероприятием является извлечение или отверждение радиоактивных рассолов.

Одновременно нет оснований делать заключения о какой-либо «дестабилизации недр», распространяя границы научных гипотез вплоть до влияния проведенных ядерных взрывов на изменение уровня Каспийского моря. Загрязнение радионуклидами десятков квадратных метров техплощадок или утечку из технологических скважин нескольких кубических метров радиоактивного рассола нельзя возвести в ранг глобальных катастроф. Разнообразные аварийные ситуации постоянно сопровождают освоение новых технологий, а тем более таких сложных, как ядерно-взрывные. Хорошо известны методы дезактивации и реабилитации территорий, в том числе находящихся за пределами границ Российской Федерации [87, 93, 95, 117, 152].

После проведенных в течение 1984-1994 гг. комплексных исследований были представлены научные обоснования и выработано коллективное мнение специалистов Министерства атомной энергии – участников работ по программе мирного использования ядерно-взрывных технологий. Результаты исследований изложены в статье [142], авторы которой сделали заключение, что нет оснований непрогнозируемое сокращение полезного объема резервуаров, созданных подземными ядерными взрывами на площадке «Вега», относить к радиационной аварии.

В условиях тектонических напряжений высокая пластичность каменной соли Сеитовской структуры исключала образование разрывных нарушений. Изученная часть соляного массива является в целом закрытой системой для ^{40}Ar , сохраняя при этом возможность локального переноса инертного газа в межкристаллические включения.

Остатки делящихся изотопов и группа радионуклидов тугоплавких элементов прочно зафиксированы в шлаковых частицах в линзе переплавленной соли. Радиоактивные продукты взрыва не могут ни выщелочиться насыщенными рассолами, ни подняться на поверхность, поскольку на ближайший миллион лет нет достоверных обоснований изменения тектонического режима региона и поднятия активной зоны на высоту 1 км.

Основной источник радиоактивного загрязнения появляется в полостях при попадании в них воды по каналам нарушения герметизации технологических скважин. При растворении радиоактивной соли внутренней и граничной зон полости образуются радиоактивные рассолы. Объемная активность рассолов в среднем составляет по ^{137}Cs до 10^{-4} Ки/л, по ^{90}Sr – до 10^{-5} Ки/л и по Т – до 10^{-2} Ки/л. Для снижения активности рассолов до безопасного уровня необходима его изоляция от биосферы не менее, чем на 300 лет. Эти условия должны быть выполнены при изоляции и консервации подземных емкостей. Извлечение на поверхность всех радиоактивных продуктов взрывов с последующим перезахоронением в настоящее время не рассматривается. Геологические и гидрогеологические условия Сеитовской соляной структуры в состоянии изолировать техногенные радионуклиды в течение времени, необходимого для снижения их активности до безопасного уровня. Полости изолированы в непроницаемой толще каменной соли, которая является основным природным барьером. По расчетным и экспериментальным данным средний

радиус распространения по соляному массиву радионуклидов не превысит 100 м за 500 лет [142]. Вторым естественным и долговременным барьером является надсолевая толща неогеновых водоупорных глин.

Потенциальным каналом распространения радионуклидов на дневную поверхность являются технологические скважины. По результатам радиоэкологического мониторинга 1994-1999 гг. установлено, что внутритрубное пространство технологических скважин является наиболее открытым и, вместе с тем, управляемым каналом миграции радионуклидов в окружающую среду [156]. При этом необходимо учесть, что технологические скважины являются сложной составной системой труб различного диаметра, в различной степени изолированных друг от друга и от вмещающих пород (рис. 69).

Ликвидация радиационно-экологических последствий на объекте «Вега» реализуется известными инженерно-техническими операциями по уже опробованным или вновь предлагаемым технологиям [157]. В числе вариантов рассматриваются методы по увеличению вязкости радиоактивных рассолов и отверждению их с помощью природных неорганических и высокомолекулярных органических веществ. Наиболее перспективной является герметизация смесями из бентонитовых глин, обладающих высокими сорбционными свойствами по отношению к радионуклидам и долговременным функционированием в качестве барьера. В настоящее время нет принципиальных трудностей для проведения изоляции технологических скважин, но для этого требуются определенные технические усилия и финансовые затраты [142].

Обследования, проведенные в середине 90-х годов, показали, что загрязнение отдельных промплощадок связано с утечками радиоактивного рассола на участках площадью нескольких квадратных метров. Максимальные мощности гамма-излучения на таких «пятнах» не превышали 0,1 – 0,2 мР/ч. Оказать какое-либо негативное воздействие на население такие загрязнения не могли [142]. В 1995 году постановлением главы Администрации Астраханской области по договору с НИС «НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» выделить финансирование на проведение детальных радиометрических работ по уточнению природы локальных цезиевых участков загрязнения на объекте «Вега» и на подготовку технического задания на разработку комплексной программы радиационной безопасности населения [158]. В 2000 г. объект «Вега» передан «Газпрому», после чего была выпущена целевая программа, и началось финансирование по проведению дезактивационных и изоляционных работ. На объекте создано хранилище твердых радиоактивных отходов и пробурено 75 скважин, входящих в систему радиоэкологического мониторинга. Низкий радиационный фон, стабильное давление на технологических скважинах и результаты ультразвуковой съемки подземных резервуаров свидетельствуют о стабильности геологической среды и надежности проведенной изоляции скважин.

Приказом от 6 февраля 2006 г. № 79 Федеральной службы по экологическому, техническому и атомному надзору проведена инспекция ООО «Подземгазпром» по контролю выполнения условий действия лицензии Госатомнадзора России от 20 мая 2004 года N ГН-04-111-1275 на проведение работ по выводу из эксплуатации объекта «Вега» и ООО «Астраханьгазпром» как недропользователя, ответственного за безопасное ведение работ в пределах горного отвода, на котором расположен объект «Вега». На всех емкостях поставлены цементные мосты и проведена дополнительная изоляция скважин с ремонтом или заменой запорной арма-

туры. Площадки забетонированы и обнесены забором из колючей проволоки с соответствующими предупредительно-запрещающими знаками. Постоянный мониторинг грунтовых и подземных вод способен предупредить о проникновении в них радионуклидов.

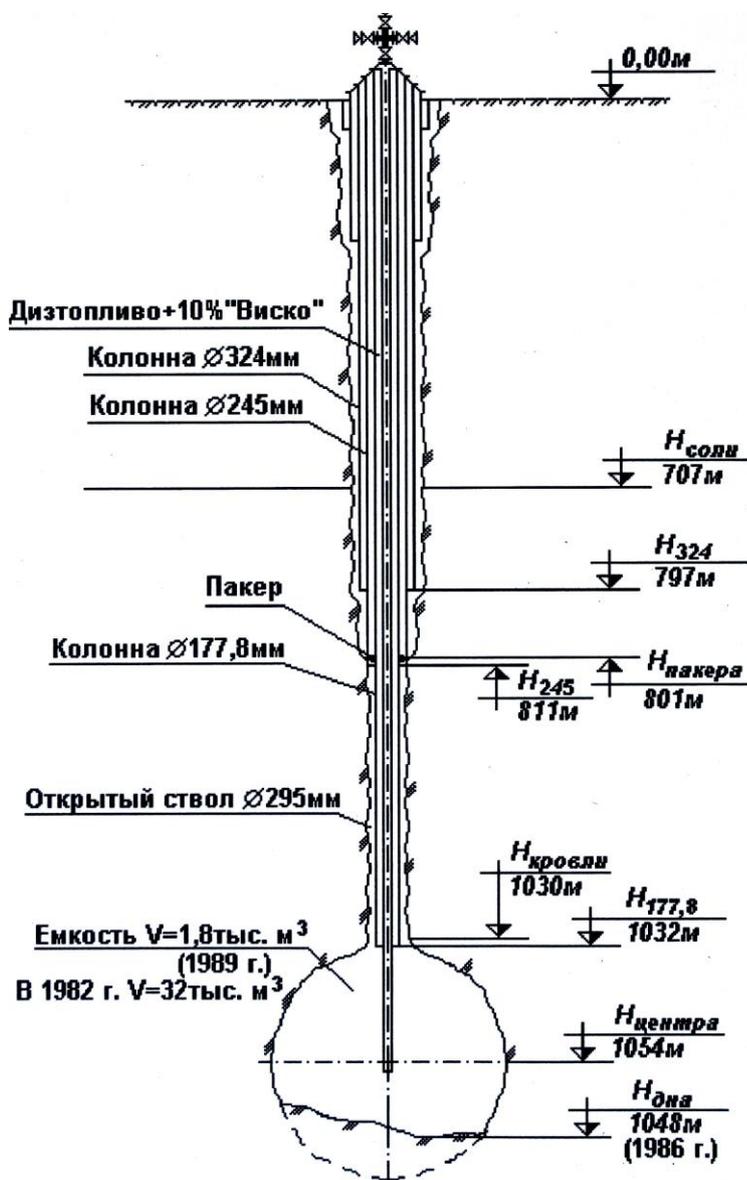


Рис. 69. Схема обустройства скважины 2-Т [148].

На рисунке приняты следующие обозначения:

- $H_{соли}$ – отметка кровли соляных пород;
- H_{324} – отметка башмака колонны обсадных труб диаметром 324 мм;
- H_{245} – отметка, до которой спущена колонна труб диаметром 245 мм;
- $H_{177,8}$ – отметка, до которой спущена колонна труб диаметром 177,8 мм;
- $H_{пакера}$ – отметка установки пакера;
- $H_{кровли}$ – отметка кровли подземной емкости (начальная);
- $H_{центра}$ – отметка размещения заряда;
- $H_{дна}$ – отметка дна подземной емкости (начальная).

Примечание: дизтопливом с адегизивной добавкой предварительно обрабатывалась труба подачи в емкость газоконденсата.

В 2011 году большая группа экологов, журналистов и представителей общественности посетили площадки объекта «Вега». На момент посещения радиационный фон составил 0,011-0,013 мкЗв (рис. 70). По мнению специалистов-экологов состояние объекта «Вега» не вызывает опасений.



Радиационный фон на объекте «Вега» не превышает естественного

Рис. 70. Измерение радиационного фона на одной из площадок во время посещения объекта «Вега» экологами и журналистами в 2011 г.

Фотография из Астраханской городской газеты «Горожанин». № 44. 2011 г.

Серьезные недоумения вызывает у специалистов появившаяся в это же время (26 сентября 2011 г.) в Интернете на сайте Astra-Novosti.ru статья «Астраханская подземная Хиросима», в которой дезинформация об объекте «Вега» до-

стигла небывало высокого уровня, а также полная безграмотность относительно источника появления в астраханских степях характерной группы радионуклидов после аварии на Чернобыльской АЭС. Авторы «страшилки» приписали их подземным ядерным взрывам. Апокалипсические домыслы поддерживаются эмоциональными высказываниями академика А.А.Яблокова.

Специалистам очевидно, что любая научно обоснованная и технически реализованная защита биосферы от техногенных радионуклидов – радиоактивных отходов ранее используемых ядерно-взрывных технологий не решает проблему безопасности в целом. Необходимо обеспечить защиту изолированных в геологических формациях долгоживущих радионуклидов от возможности искусственного внедрения в зону горного отвода проведения подземных ядерных взрывов. Роль «человеческого фактора», вооруженного мощными техническими средствами, может оказаться предельно негативной и опасной.

8. Карачаганакское газоконденсатное месторождение. Объект «Ли́ра»

В 1983-1984 гг. в соляном куполе вблизи Карачаганакского газоконденсатного месторождения ядерными взрывами было создано шесть полостей-хранилищ. Район строительства получил название объект «Ли́ра» (рис. 30).

Месторождение расположено в северо-западной части Казахстана в 115 км восточнее г. Уральска и в 30 км к северо-востоку от районного центра Аксай и административно входит в состав Бурлинского района Уральской области Республики Казахстан.

Карачаганакское месторождение относится к Прикаспийской нефтегазоносной провинции. Открыто в 1979 году, является одним из крупнейших газоконденсатных месторождений в мире. Начальные запасы составляют 1,35 трлн. м³ газа, 1,2 млрд. т нефти и газового конденсата [135]. Промышленное освоение началось в

середине 80-х годов ПО «Оренбурггазпром» Министерства газовой промышленности СССР [149].

Залежь приурочена к крупному подсолевому рифогенно-карбонатному поднятию широтного простирания амплитудой до 1600 м. Сводовая часть месторождения расположена в межкупольной зоне между Карачаганакским и Коншебейским соляными массивами (рис. 71).

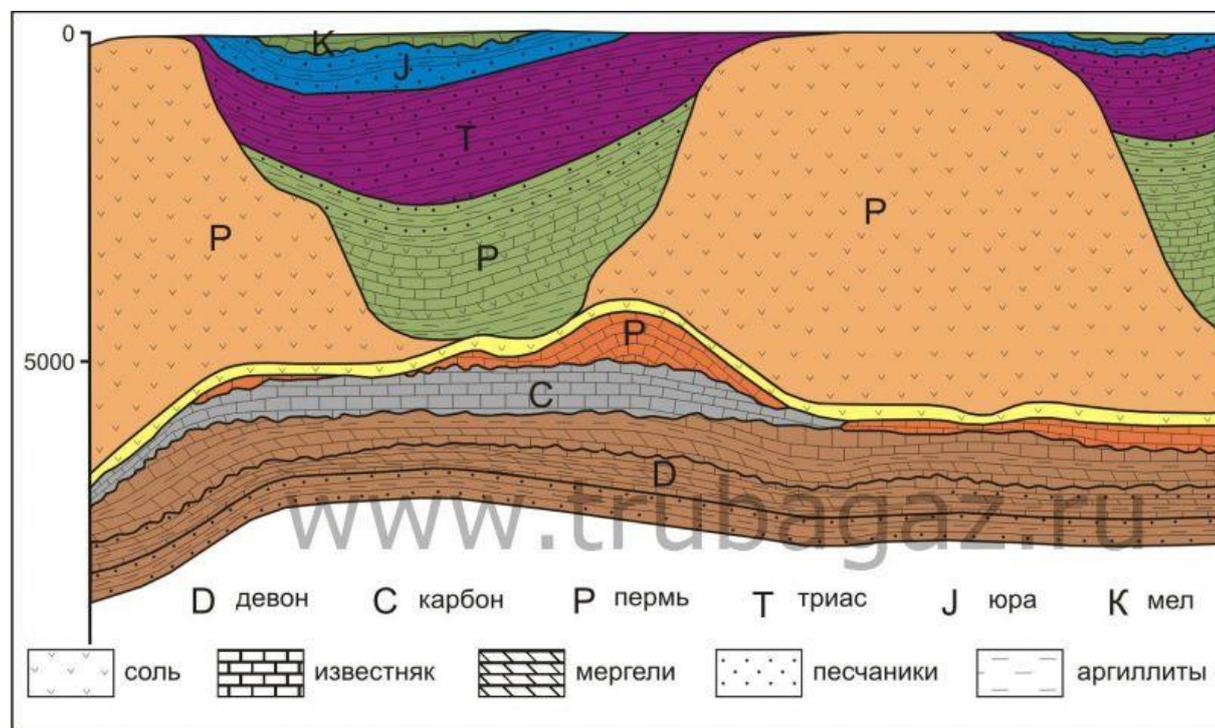


Рис. 71. Схема геологического строения Карачаганакского месторождения, trubogaz.ru/gkm/karachaganakskoe-ne... (обращение 22.05.213).

Газоконденсатно-нефтяная залежь приурочена к пористо-кавернозному рифу нижнепермского возраста и трещиноватым доломитам и известнякам среднего и нижнего карбона. Глубина залегания кровли залежи 3600-3735 м.

Пространство между соляными куполами заполнено верхнепермскими-триасовыми терригенными отложениями. Купола и межкупольные прогибы перекрываются морскими терригенными и терригенно-карбонатными породами юрского, мелового, неогенового и четвертичного возраста.

Приведенные далее фактические данные, таблицы и рисунки даны по публикациям [73, 75, 87], а также по материалам отчетов Радиевого института им. В.Г.Хлопина о геохимических исследованиях Карачаганакского соляного купола (1984-1985 гг.)

Внутреннее строение соляных куполов по сейсмическим данным характеризуется хорошо выраженной слоистостью. Эти данные подтверждаются геологическим разрезом, составленным по результатам разбуривания разведочной скважины на центральном участке Карачаганакского соляного купола (табл. 50).

Формирование и развитие Карачаганакской солевой структуры определялось тектоникой подсолевых высокоамплитудных рифогенных поднятий и положением ведущего структурного элемента северного борта прикаспийской низменности – Иртекского выступа. Соляные гряды вблизи выступа разделены мульдами, из кото-

рых соль почти полностью выжата в процессе перемещения соляных масс. Ядра соляных куполов прорывают вышележащие пермские и частично мезозойские отложения. Карачаганакский купол (соляная гряда) имеет овальную форму, вытянутую в субширотном направлении. По изогипсе кровли кунгурских соляных пород 200 м длина гряды составляет 28 км, ширина – 5-7 км.

Таблица 50. Геологический разрез Карачаганакского соляного купола по данным разведочной скважины I-РК.

Интервал глубин, м	Описание пород
0-68	<u>Неоген-четвертичные отложения.</u> Переслаивание светло-бурых суглинков, мелкозернистого песка, желтовато-бурых мергелистых глин и песчаников.
68-248	<u>Нижне-триасовые отложения.</u> Переслаивание загипсованных глин с алевролитами, песками и песчаниками.
248-357	<u>Кунгурский ярус нижней перми.</u> Ангидрит мелкозернистый плотный, местами трещиноватый с прослоями и линзами гипса (10-20%).
357-728	Каменная соль от крупнозернистой до среднезернистой. Окраска белая, серая, структура массивная или горизонтально-слоистая. Содержит прослои и линзы ангидрита, ориентированные под углами 45°-50° к оси керна.
728-745	Ангидрит мелкозернистый, плотный, серый.
745-781	Каменная соль разнозернистая с линзами мелкозернистого ангидрита.
781-788	Ангидрит серый, мелкозернистый.
788-900	Каменная соль разнозернистая, горизонтально-слоистая с прослоями и линзами ангидрита под углами 45°-75° к оси керна.
900-916	Ангидрит мелкозернистый, плотный, серый с прослоями аргиллита под углами 45°-55° к оси керна.
916-988	Каменная соль крупнозернистая, прозрачная, горизонтально-слоистая с прослоями микрозернистого ангидрита под углами 55°-75° к оси керна.
988-1009	Ангидрит мелкозернистый, серый, плотный, местами с линзами каменной соли.
1009-1107	Каменная соль крупнозернистая с прослоями и линзами мелкозернистого ангидрита под углами 45°-55° к оси керна.
1107-1112	Ангидрит мелкозернистый, массивный.
1112-1121	Каменная соль крупнозернистая, белого и серого цвета.
1121-1198	Ангидрит мелкозернистый, плотный, массивный.
1198-1267	Каменная соль крупнозернистая, белого и серого цвета с прослоями ангидрита и аргиллита. Текстура породы косослоистая под углами 30°-45° к оси керна.

Карачаганакский купол имеет пологий северный склон (10°) и крутой южный склон (до 50°). Вдоль южного склона по геофизическим данным предполагается

ся разлом (Акшесайский) [159]. Внутренняя структура купола сложная, с отсутствием пространственной корреляции прослоев и линз ангидрита, что свидетельствует о деформации крупного соляного массива в процессе формирования бортовых структур Прикаспийской впадины. Как и в солевых структурах Оренбуржья, характерно чередование соляных пластов с прослоями ангидрита и сульфатно-галогенных пропластков [87]. При этом достаточно мощные прослои ангидритовых пород создают своеобразный жесткий каркас всей солянокупольной структуре.

В мономинеральных прослоях галита (примесь ангидрита менее 1%) средний размер кристаллов 0,3-0,5 мм. В зонах перекристаллизации галит достигает размеров 2-3 см.

Для всех проб каменной соли, отобранных по разрезу разведочной скважины, характерно присутствие внутрикристаллических и межкристаллических газожидких включений. Ширина отдельных плоских межкристаллических включений достигает 400-500 мкм. Крупные включения имеют прямоугольные или овальные очертания и соединяются между собой капиллярами шириной 7-12 мкм (рис. 16, 72). Встречаются зоны залеченных трещин, насыщенные изолированными преимущественно жидкими включениями прямоугольной формы с размерами 20-40 мкм (рис. 73).



Рис.72. Участок развития межкристаллических газожидких включений в образце каменной соли из разведочной скважины I-РК. Увелич. 500.

Практически мономинеральные соляные породы сменяются по разрезу прослоями средне- мелкозернистого ангидрита с незначительными примесями галита. Отмечено присутствие примазков черного битумоподобного вещества.

Линзы и гнезда ангидрита размером до 8-10 см встречаются в соляных пластах по всему разрезу, вскрытому разведочной скважиной.

Основным компонентом водонерастворимого остатка каменной соли является ангидрит, и лишь в небольших количествах (менее 1% ВНО) присутствуют глинистые минералы.

Среднее значение гигроскопической влажности галитовых пород составляет 0,3-0,4 %.

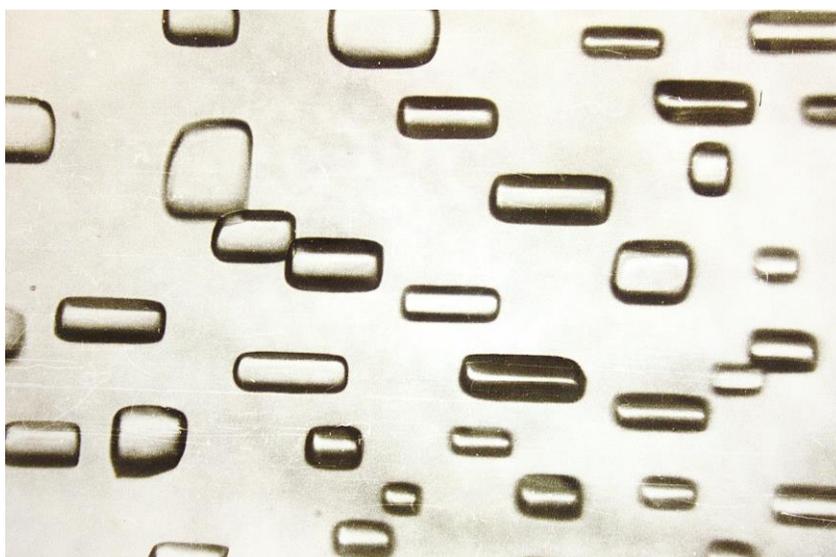


Рис. 73. Жидкие включения прямоугольной формы в зоне перекристаллизации галита. Разведочная скважина I-РК. Увелич. 450.

Химический состав отдельных проб, отобранных по разрезу скважины I-РК, приведен в таблице 51. Проанализированы образцы практически мономинеральных галитовых пород, а также образцы из ангидритовых прослоев (пробы №№ 25-28).

Таблица 51. Химический состав проб пород по разрезу разведочной скважины I-РК (801 – 1083 м)

Компонент, % масс.	Номера проб							
	11	12	13	14	16	17	25	26
$\text{SiO}_2 \cdot 10^{-2}$	1,95	15,3	2,7	–	10,9	0,25	3,30	2,10
$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 10^{-2}$	0,66	2,17	3,52	–	2,18	0,20	4,20	4,20
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 10^{-2}$	0,47	3,26	1,76	–	8,07	0,68	1,80	1,80
Ca^{2+}	0,49	14,03	3,96	0,29	18,7	2,27	30-35	30-35
Mg^{2+}	0,069	0,97	1,34	0,02	1,06	0,086	0,38	0,72
Na^+	36,62	17,78	30,40	37,05	12,82	33,71	0,10	0,05
Cl^-	56,68	27,74	46,90	57,33	19,86	52,89	0,12	0,11
SO_4^{2-}	1,48	37,74	15,24	0,82	47,89	5,74	64-69	64-69
HCO_3^-	0,01	0,09	0,07	0,01	0,13	0,02	0,04	0,07

Полученные данные позволяют прогнозировать после взрывов на Карачаганском куполе развитие «ангидритового» варианта форм стабилизации техногенных радионуклидов, примером которого является взрыв А-II на объекте «Галит». Стабилизация радионуклидов высокотемпературных элементов, в том числе и делящегося вещества, будет обеспечена примесями оксидов железа, кремния, а также металлами конструкций зарядного устройства [89].

Соленосная толща на территории объекта «Лира» по результатам исследования разведочных и технологических скважин в интервале 345-1300 м по гидрогеологическим условиям признана герметичной.

В составе кепрока выделяются ангидритовые и гипсово-ангидритовые породы с незначительными примесями терригенных глинистых и карбонатных пород. В зоне солевого кепрока приток вод отсутствует.

Ближайший к соленосным отложениям водоносный горизонт расположен в породах триаса в интервале 180-200 м. Общая мощность триасовых отложений на участке проведения взрывов составляет 80-180 м. Породы представлены глинами, песками, алевролитами, песчаниками прикаспийской серии нижнего триаса и аралсорской серией верхнего триаса. Воды гидрокарбонатно-натриевые с плотностью 1,02 г/см³. Дебит 0,6 м³/час при динамическом уровне 40-150 м. Пьезометрический уровень – 40 м.

Неогеновые отложения представлены глинами, мергелями, алевролитами, песками акчагыльской свиты плиоцена, мощностью от первых метров до 150 м, и глинами, суглинками, супесями, песками, гравием сыртовской свиты плиоцен-нижнечетвертичного возраста. Отложения неогена обводнены.

Большой объем исследований каменной соли Карачаганакского купола проведен по изучению ее газоносности и выделению газов при нагревании. Эти данные были необходимы для корректировки проведения наиболее радиационно-опасной операции подготовки к сдаче в эксплуатацию подземных емкостей – стравливания из полостей паро-газовой смеси.

При растворении каменной соли определялись количества и состав газов из газово-жидких включений. При нагреве проб до 1000°С к газам включений присоединяются газы термохимических реакций разложения и плавления минералов [94].

Объемы газов, выделяющихся при растворении, сравнительно невелики – от 3,4 до 17,4 см³/кг. Основным их компонентом является диоксид углерода – 54,3 – 83,1 %. Следующим по объему в смеси является азот – 11,9 – 35,3 %, а затем метан – 0,6 – 2,0 %. Эти три компонента являются характерными для газово-жидких включений, однако их общее количество по сравнению с каменной солью других регионов и соленосных бассейнов сравнительно невелико. Объемы свободных газов в отдельных случаях достигают 115 см³/кг [94].

Количество газов, выделяющихся из солевых пород при плавлении, значительно больше, чем при растворении и варьирует от 120 до 6900 см³/кг. Основным составляющим этих газов является диоксид углерода (80-98 % по объему), а источником – карбонатные минералы, в первую очередь – кальцит. Распределение карбонатов в каменной соли неравномерное, что и определяет значительные разбросы данных по содержанию СО₂ в отдельных пробах.

Анализ газов при ступенчатом нагреве каменной соли (табл. 52) показал, что при выделении СО₂ наблюдаются два максимума. Первый – в интервале температур 450-500°С, а второй, менее значительный, – при температурах 600-650°С. Первый, по-видимому, связан с разложением углеводородов (битумных веществ), а второй – с разложением карбонатов (доломита). Максимум выделения метана наблюдается при температурах около 450°С, что подтверждает его связь с органическим веществом. Максимальные количества водорода выделяются при температурах около 500°С, по-видимому, за счет реакций паров воды с железом, которое присутствует в примесных минералах.

Таблица 52. Выделение газов при ступенчатом нагревании каменной соли.
Скважина I-РК, проба № 11, глубина 801 м

Т °С	Сумма газов, см ³ /кг	Объемные доли, %				
		СО ₂	СО	СН ₄	Ν ₂	Н ₂
250	3,2	68,7	10,6	8,4	8,1	6,2
320	11	88	7,7	3,7	1,3	1,8
400	10,9	91	3,9	1,4	0,5	2,9
450	128	98	0,3	0,3	0,01	1,0
500	133	97,7	0,3	0,2	0,01	1,0
550	84	98,8	0,1	0,2	0,02	0,7
600	114	94,7	0,1	0,1	0,2	0,3
650	146	97,9	1,5	0,01	0,03	0,05
700	80	98,7	0,8	0,06	0,05	0,05
750	55	99,2	0,5	0,05	0,1	0,1
800	16,5	98,2	1,1	0,1	0,07	0,5
850	17,8	98,8	0,6	–	0,2	0,2
900	9,5	96,8	3,3	–	0,8	0,1
Среднее		97,7	1,0	0,5	0,3	0,6

Для пород Карачаганакского купола проведены изотопно-геохронологические исследования, которые являются дополнительным критерием для оценки «закрытости» соляных массивов [42]. В керновых пробах, полученных при разбуривании технологических скважин, содержание калия в каменной соли варьировало от 0,3 до 0,7 масс.%. В отдельных образцах обнаружена наложенная поздняя сильвиновая минерализация, спорадическое распределение которой объясняет широкие вариации объемной доли ⁴⁰Ar – от $1,2 \cdot 10^{-8}$ до $1,9 \cdot 10^{-5}$ см³/г. Возрастные метки для 40 проб не превышают 300-350 млн. лет. Возраст наложенной сильвиновой минерализации датируется интервалом 100-120 млн. лет. Следовательно, в течение этого времени в соляном массиве не происходили процессы перекристаллизации и миграция радиогенного аргона-40. Необходимо отметить, что «закрытость» пород сохраняется, несмотря на наличие системы межкристаллических каналов миграции и возможности перемещения по ним относительно слабо связанного с кристаллической структурой минералов радиогенного благородного газа ⁴⁰Ar [42].

Технологические скважины объекта «Ли́ра» расположены в долине р. Березовки на расстоянии ~ 1,5 км друг от друга (рис. 74). Общая площадь объекта около 10 км². На этом участке глубина залегания соленосных пород ~ 330 м. Наиболее перспективные для сооружения хранилищ участки располагаются в интервалах 750-1100 м, в разрезе которых преобладает каменная соль, чередующаяся со сравнительно маломощными прослоями ангидритовых пород.

Взрывы на объекте «Ли́ра» проведены двумя сериями по три взрыва в июле 1983 и 1984 г. (табл. 53). При взрыве 2-Тк произошло неконтролируемое истечение радиоактивных газов из технологической скважины. Истечение началось через 1 ч 45 мин после взрыва, и через 35 мин уровни экспозиционной дозы на оголовке скважины достигли максимальных значений – 0,35 Гр/ч (~ 35 Р/ч). Со временем мощность дозы снижалась. Радиоактивные компоненты выходящих газов были представлены изотопами благородных газов и йода. После герметизации скважины мощность дозы на ее устье составила 40 мР/ч, а через 18 суток не превышала

5 мР/ч. Истечение радиоактивных продуктов взрыва в скважине 2-Тк не было отнесено к разряду нештатных радиационных ситуаций [87].



Рис. 74. Расположение технологических скважин объекта «Ли́ра» на прибрежных участках реки Березовки.

Таблица 53. Подземные ядерные взрывы, проведенные на Карачаганакском соляном куполе для создания полостей-хранилищ [73, 87].

Дата проведения взрыва	Шифр взрыва и полости	Глубина заложения заряда, м	Мощность взрыва, кт ТЭ	Объем полости, тыс. м ³
20.07.1983 г.	1-Тк	907	15	54
- " - "	2-Тк	917	15	66
- " - " -	3-Тк	841	15	45
21.07.1984 г.	4-Тк	816	15	47
- " - " -	5-Тк	844	15	50
- " - " -	6-Тк	955	15	48

На начальной стадии работ по подготовке полостей к эксплуатации проводилось их вскрытие через технологическую скважину и первичное стравливание парогазовой смеси. В процессе управляемого выпуска из полостей парогазовой смеси проводилось систематическое опробование и изучение ее химического и радионуклидного состава. Этот этап работ описан ранее для объекта «Вега».

На объекте «Ли́ра» во время первичного вскрытия полости 5-Тк было установлено начало ее затопления подземными водами через нарушения герметизации затрубного пространства скважины [87].

Для всех полостей, созданных в солях Карачаганакского купола, характерна диоксидная атмосфера с содержанием CO_2 до 97 % по объему смеси, что и прогнозировалось по предварительным исследованиям выделения газов из пород при нагревании.

Основной технологической операцией по оценке герметичности полости была ее опрессовка природной газовой смесью. Этому предшествовала продувка полости сухим природным газом. После окончания всех подготовительных операций полостные газы, содержащие примеси техногенных радионуклидов, выпускались в атмосферу. По результатам исследований вторичного стравливания на объектах по созданию подземных полостей-хранилищ были сделаны следующие выводы [87]:

- при стравливании в атмосферу закачанных в полость газов происходит вынос главным образом криптона-85 и трития;
- радиационная значимость серы-35 в аэрозольной составляющей незначительна;
- при вторичном стравливании в газовой смеси практически отсутствует криптон-85, который выносится в атмосферу во время первичного стравливания и при продувке полости;
- тритий, несмотря на многократный газообмен в полости, выносится при вторичном стравливании в малых количествах – до 10% от его «запасов», преимущественно в форме молекулярного водорода и углеводородов, а его основная часть остается в виде окиси в полости и зоне трещиноватости;
- радиационная опасность операций по вторичному стравливанию значительно ниже операций первичного стравливания полостной парогазовой смеси.

Сделанные выводы послужили обоснованием для разработки технологического регламента подготовки полостей-хранилищ, созданных с использованием ядерновзрывных технологий.

В процессе и по завершению подготовки к эксплуатации проводился пробоотбор и исследования объектов внешней среды. В таблице 54 приведены выборочные данные о суммарной бета-активности проб почвенно-растительного покрова в районах технологических площадок 1-Тк – 6-Тк, полученные в 1984-1991 гг. [75].

Проведение работ по созданию и обустройству подземных резервуаров на объекте «Ли́ра» не повлияло на радиационную обстановку технологических площадок и в районе их расположения. Уровни значений удельной активности почвенно-растительных проб по ^{137}Cs и ^{90}Sr , суммарная бета-активность и мощность экспозиционной дозы на местности находятся в пределах изменений фоновых значений, характерных для данного региона. Некоторое повышение средних уровней радиоактивности в пробах, отобранных в 1988 г., связано с аварией на Чернобыльской АЭС.

Таблица 54. Среднее значение удельной бета-активности проб почвенно-растительного покрова в районе технологических площадок объекта «Ли́ра», Бк/кг [75]

Площадки	Вид проб	Фон 1984 г.	После взрывов 1984 г.	1988 г.	1989 г.	1991 г.
1-Тк	Почва		890	260	250	680
	Растит.		190	670		220
2-Тк	Почва			470		960
	Растит.			800		320
3-Тк	Почва			360		1000
	Растит.			380	1000	330
4-Тк	Почва	590	700	400	460	900
	Растит.	150	210	610	410	390
5-Тк	Почва	740	640	400	340	700
	Растит.	230	250	510	740	300
6-Тк	Почва	660	660	330	360	790
	Растит.	240	230	1050	550	410

Значения объемной активности исследованных водных проб (табл. 55) не превышает порога допустимых концентраций ДКБ по долгоживущим радионуклидам для питьевой воды. Объемная активность проб воды по тритию составила менее 0,28 кБк/л (предел обнаружения применявшейся методики).

Таблица 55. Объемная активность* водных проб в районе объекта «Ли́ра», Бк/л [75]

Водоем	Фон 1984 г.	1988 г.	1990 г.	1991 г.
Р.Илек у впадения р.Березовки	0,1		0,2	0,2
Р.Березовка у п. Карачаганак	0,3	1,5	0,3	0,4
Р. Березовка к С-3 от 2-Тк		1,5		
Р. Березовка к В от 3-Тк		1,9		
Водоем п. Карачаганак	0,7			
Р.Урал у впадения р.Илек		1,8		

* - объемная бета-активность воды определяется путем измерения бета-активности сухого остатка выпаренной воды определенного объема без учета активности окисленного трития.

Контроль и анализ радиоэкологической обстановки на объекте «Ли́ра» с момента ее создания до конца 1992 года осуществлялся сотрудниками Радиевого института им. В.Г. Хлопина [75].

По совокупности полученных геолого-гидрологических и радиоэкологических данных установлено, что техногенные радионуклиды шести подземных ядерных взрывов на объекте «Ли́ра» изолированы на локальном участке Карачаганакского соляного купола. Полости и окружающие их зоны трещиноватости перекрыты от вышележащих водоносных горизонтов сульфатно-галитовыми породами мощностью не менее 500 м. История геологического развития региона позволяет считать, что Карачаганакская солянокупольная структура в ближайшем геологиче-

ском будущем сохранит стабильность и будет способна локализовать в своей среде техногенное радиоактивное внедрение – полости с радиоактивными продуктами ядерных взрывов.

После распада Советского Союза в 1991 году территории Карачаганакского месторождения и объекта «Ли́ра» вошли в состав самостоятельного государства Республики Казахстан. Правительство Казахстана отказалось от сотрудничества с РАО «Газпром» и стало заниматься поиском иностранных партнеров по освоению месторождения. В настоящее время на условиях соглашения о разделе продукции создан международный консорциум в составе British Gas и Eni (по 32,5 %), Chevron Техасо (20 %) и «Лукойла» (15 %). Для реализации проекта освоения месторождения эти компании объединились в консорциум «Карачаганак Петролиум Оперейтинг Б.В.», который будет управлять проектом до 2038 г. [160].

Радиоэкологический мониторинг объекта «Ли́ра» и его влияние на Карачаганакское месторождение с 1998 года проводит Аксарайский филиал Института ядерной физики Национального ядерного центра Республики Казахстан [161]. В контрольных точках ежегодно определяются содержания ^{90}Sr , ^{137}Cs и трития в пробах грунта и воды. За весь период наблюдений (до 2007 года) каких-либо радиационных аномалий не зафиксировано. Концентрация техногенных радионуклидов находится на уровне фоновых значений. В грунтово-почвенном слое до глубины 30 см концентрация $^{90}\text{Sr} < 5$ Бк/кг, концентрация ^{137}Cs – 6,6 Бк/кг [162]. Близ скважин 4-Тк и 5-Тк выявлены и рекультивированы отдельные участки радиоактивного загрязнения с уровнями мощности доз излучения до 0,5 мкЗв/ч (50 мкР/ч). В пойме р. Березовки обнаружены повышенные, но «не представляющие опасности для живых организмов и окружающей среды» содержания ^{90}Sr , которые по мнению автора диссертации, являются последствием стравливания газов из полости 2-Тк [162].

В 2000 г. на Международной конференции «Мониторинг ядерных испытаний и их последствия» (п. Боровое Акмолинской обл., Республика Казахстан) был представлен доклад о возможности миграции техногенных радионуклидов на поверхность земли по разрывным нарушениям, возникшим после проведения взрывов [163]. По данным сейсморазведки, анализа геологической информации и реконструкции структур прогнозировались четыре стратиграфических уровня возможной миграции радионуклидов. По мнению авторов доклада «общая площадь заражения по верхней части разреза, сложенного четвертичными образованиями, может составить порядка 100 кв. км [163].

В рамках радиоэкологического мониторинга, который осуществляется Аксайским филиалом НЯЦ РК проведены детальные исследования распределения ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ на территории объекта «Ли́ра», на местах предполагаемых разрывных нарушений, а также в пойме и русле р. Березовка. Полученные результаты однозначно свидетельствуют о нахождении этих радионуклидов в верхних частях грунтово-почвенного слоя. Ни в одном из 60 обследованных шурфов значимых концентраций ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ на глубинах ниже 70 см не обнаружено. Полученные фактические данные позволили сделать заключение, что «выдвинутую ранее гипотезу о наличии механизма притока искусственных радионуклидов на поверхность земли по зонам разуплотнения и трещиноватости в земной коре, на полном основании, можно считать несостоятельной» [162].

Кроме площадки объекта «Ли́ра», радиационное обследование проведено на значительных территориях Западно-Казахстанской области, включая Карачаганакское месторождение и ближайšie к нему населенные пункты. По результатам ши-

рокомасштабного радиоэкологического исследования установлено, что радиационная обстановка на этих территориях находится в пределах фоновых уровней. Авторы проводимых исследований отмечают, что даже при отсутствии серьезных научных предпосылок полученные результаты имели большую социально-психологическую значимость, поскольку способствовали снятию стрессового состояния у местного населения, проживающего в местах «проведения ядерных испытаний» [162].

Изначально четыре полости 1-Тк, 3-Тк, 4-Тк и 6-Тк использовались как буферные резервуары-хранилища и являлись одной из составных частей технологической схемы эксплуатации месторождения. В настоящее время они заполнены газоконденсатом под давлением ~ 50 атмосфер и не используются. В 2006 г. Аксарайнобским филиалом ИЯФ НЯЦ РК в этих четырех полостях был выполнен комплекс геофизических исследований. Их результаты свидетельствуют о сохранении объема подземных полостей, отсутствии миграции радионуклидов из них и нормальном радиационном фоне в геологическом блоке пород над полостями. Установлена также исправность подземного технологического оборудования [161].

Следовательно, экспериментально установлено, что полости-хранилища, созданные подземными ядерными взрывами в солянокупольной структуре, сохранили свои первоначальные размеры и условия изоляции техногенных радионуклидов в течение более 20 лет.

Необходимо отметить, что в каменной соли Карачаганакского купола широко развиты межкристаллические газово-жидкие включения, наличие которых может значительно ускорить процессы конвергенции, как это и произошло на Сеитовской структуре объекта «Вега». Однако в Карачаганакской солянокупольной структуре присутствует «ангидритовый каркас», ограничивающий развитие риолитических процессов.

Кроме того, весьма существенно, что все время полости были заполнены газоконденсатом, т.е. существовало противодействие, которое способствовало сохранению объемов подземных емкостей.

Начиная с 2006 г. специалисты ИЯФ Национального ядерного центра Казахстана проводят эксперименты по утилизации радиоактивных отходов полости 5-Тк. Разрабатываются технико-экономические обоснования работ по ликвидации подземных полостей или возврату их в технологическую схему разработки месторождения. Ликвидационные работы предполагают заполнение полостей высоковязким материалом, обладающим достаточными сорбционными свойствами. Для этого может быть использован ряд промышленных отходов, например, нефтяные шламы и замазученные грунты. Кроме того, подземные полости можно использовать для сброса всех промышленных отходов, возникающих в процессе освоения и эксплуатации крупного газоконденсатного месторождения [160].

9. Хранилища радиоактивных отходов в каменной соли

Каменная соль – первая, и пока единственная геологическая формация, которая была не только рекомендована, но и использована для подземной изоляции радиоактивных отходов и сооружения ПЗРО. В документах МАГАТЭ каменная соль оценивается как малопроницаемая, пластичная и практически необводненная геологическая среда с малозатратными условиями создания подземных выработок [164].

Перспективность участков изначально оценивается по нескольким общеизвестным геологическим критериям:

- литологический состав соленосных отложений;
- мощность соленосных отложений;
- глубина и условия залегания соляного тела;
- обводненность участка;
- непроницаемость и прочность каменной соли;
- геотермические условия.

По этим критериям обычно оцениваются участки не только для подземной изоляции радиоактивных отходов, но и для создания подземных емкостей методом размыва и строительства подземных сооружений различного целевого назначения [28, 35].

До изложения данных, характеризующих хранилища РАО в каменной соли целесообразно выделить две нерешенные проблемы, которые в какой-то степени объясняют отсутствие или задержки реализации строительства ПЗРО:

- трудности разработки научно обоснованного и доступного для понимания неспециалистов долгосрочного прогноза условий подземной изоляции РАО;
- неготовность правительства и общественности к принятию ранее неизвестной и потенциально опасной технологии, поскольку обращение с РАО приобрело существенное социально-политическое значение.

Первая проблема является научно-теоретической, и существует методология её решения, требующая комплексного подхода и привлечения данных по различным направлениям наук о Земле [112, 132].

За последние тридцать лет по результатам крупных международных программ подтверждена возможность создания подземного геотехнологического комплекса ПЗРО, который обеспечивает безопасное хранение РАО в течение, как минимум, 300 лет, а при благоприятных геологических условиях – на протяжении десятков и даже сотен тысяч лет. Время, требуемое для изоляции долгоживущих радионуклидов, может охватывать крупные циклы эволюции поверхности Земли и биосферы: морские трансгрессии и регрессии, эпохи оледенения, глобальные изменения климата и пр. Реконструировать состояние участка литосферы на сотни тысяч лет вперед можно лишь геологическими методами [132]. Подземная изоляция долгоживущих радионуклидов требует расширения начальных геологических характеристик, введение дополнительных критериев, как это было, например, показано при изучении условий изоляции радиоактивных продуктов ядерных взрывов [42]. При этом необходимо учитывать, что для весьма отдаленных периодов времени в будущем, неопределенности, связанные с количественными оценками различных параметров, становятся настолько большими, что сами критерии не могут служить разумной основой для принятия решений [165].

Трудности разработки долгосрочного прогноза нашли свое отражение в многочисленных методологических требованиях, предъявляемых при оценках достоверности результатов [112, 119, 132]:

- дифференциальный анализ объектов по различным пространственным и временным параметрам (прогноз – глобальный, региональный, локальный; прогноз на различные интервалы времени – 500 лет, 100 000 лет, 1 миллион лет);
- итеративный анализ прогнозируемых процессов всего иерархического ряда геологических объектов – от глобальных структур до отдельных минералов;
- использование в качестве базовой характеристики изучаемого района геоинформационной системы (ГИС) с оценками экстремальных ситуаций;
- для прогностической экстраполяции используются палеореконструкции развития геологических структур, рельефа и климата; хроностратиграфические, палеогидрогеологические, палеосейсмологические и прочие исследования;
- для решения ключевого вопроса безопасности – прогнозирования миграционных процессов – выделяются два основных фактора, определяющие миграцию и изменяющиеся во времени – тектонический и климатический;
- для количественных оценок используются методы изотопной геохимии и геохронологии;
- для подтверждения научного обоснования долгосрочного прогноза используются природные и техногенные аналоги;
- надёжность долгосрочного прогноза повышается в случае выбора площадок не только по критерию стабильности, но и по критерию предсказуемости развития геологических формаций региона;
- в локальных структурах неоднородности более контрастны, чем в крупномасштабных объектах;
- степень определенности и достоверности прогноза уменьшается по мере ограничения размеров структуры: от глобальных до локальных.

Анализируя геотехнологическую систему подземной изоляции РАО, требуется оценить корректность используемых количественных параметров. Для инженерных барьеров (инженерно-технологической подсистемы) существуют правила, нормы и стандарты, соблюдение которых дает гарантии безопасности в пределах используемых научно-технических регламентов. Получение корректных количественных параметров для такого специфического и экстраординарно сложного объекта, как геологическая среда, существенным образом затруднено [166, 167]. На современном уровне знаний о Земле, количественные оценки обычно опираются на многие предпосылки. В настоящее время нельзя составить точный прогноз поведения сложных природных систем (геологических, геохимических, экологических и пр.) под воздействием возмущающих факторов техногенного внедрения – создания подземных хранилищ РАО. Получаемые оценки имеют неопределенность, которая сохраняется независимо от того, сколько дополнительной информации будет получено. Изменчивость ряда параметров природной системы определяется не флуктуациями, а самой структурой системы. Дополнительные осложнения вызывает зависимость состояния и поведения геологических формаций от истории их формирования и последующего развития. Всё это требует исключительно строгого и объективного контроля принимаемых количественных параметров, как для отдельных критериев, так и для других количественных оценок. Безопасность геотехнологической системы изоляции РАО в конечном итоге определяется вероятностью выхо-

да радионуклидов за установленные границы горного отвода и попадания в сферу обитания человека в количествах свыше установленных норм. Расчетными моделями определяются возможность и наиболее вероятные параметры миграционных процессов, которые со временем могут произойти в хранилище и в его геологическом окружении. Модельные расчеты завершаются оценками радиационного риска, определением индивидуальных доз для всего времени изоляции РАО.

Все проводимые исследования рисков объединяет общая «некорректность», поскольку:

- объектом изучения является геохимическая система миграции, состояние и развитие которой подчиняются природным законам;
- конечный результат исследований – дозы излучения и риск – являются искусственно вводимыми социально-техническими понятиями с изменяющимися количественными оценками.

Никакие современные расчетные модели не могут полностью доказать и тем более прогнозировать на длительные сроки безопасность какой-либо человеческой деятельности, поскольку признание допустимого риска остается вопросом не объективной аргументации, а эмоций [168].

В 2002 г. эксперты Комитета МАГАТЭ по разработке норм безопасности по обращению с радиоактивными отходами (Waste Safety Standarts Commitee) и аналогичного комитета NEA OECD сделали вывод, что в ряде случаев показатели «дозы излучения» и «риск» необходимо заменить более определенно прогнозируемыми характеристиками, например концентрациями радионуклидов в окружающей среде. Одновременно произошел переход от концепции «нулевого риска», или «абсолютной безопасности», к концепции «приемлемого риска». Была переработана и геологическая концепция: переход от «хранения и удержания» РАО к «контролируемому высвобождению и дисперсии» в пределах заранее ограниченного объема окружающих горных пород [169].

Использование количественных значений риска для оценок безопасности подземной изоляции РАО или проведения эколого-экономической оценки хранилища, руководствуясь риском в качестве критерия – это возврат к пройденным ошибкам. Техногенный риск, вычисленный как вероятность потенциально возможных негативных последствий, остается «виртуальным» показателем, не влияющим на конечную оценку – медицинские показатели [170].

Влияние дозовых нагрузок на жизнедеятельность человека и окружающую среду в будущем достоверно не известно. Оценка дозы как основного показателя при прогнозировании не корректна. Поэтому более целесообразно оценивать безопасность значениями концентраций техногенных радионуклидов в реках и подземных водах и сравнивать их с концентрациями природных радионуклидов [171].

В сложившейся достаточно сложной ситуации для выбора научно обоснованных количественных оценок, определяющих степень безопасности (или опасности) подземных хранилищ РАО, наиболее целесообразно разделить проблему по уровням достоверности количественных оценок:

- 1) Количественные данные, полученные опытным путем для инженерно-технологических характеристик устойчивости матриц, сохранности контейнеров и оценки длительности функционирования буферных материалов. Для радиоактивных отходов подземных ядерных взрывов это широкий набор форм стабилизации или миграции техногенных радионуклидов – от устойчивых силиктно-железистых шлаков до радиоактивных рассолов.

2) Оценки возможности миграции радионуклидов за пределы расчетного ореола рассеяния и выхода в зоны активного водообмена в количествах, превышающих установленные нормы. Радиационные риски рассчитываются для различных радионуклидов, различных сценариев развития миграционных процессов и математических моделей. Безопасность подземной изоляции (более 10 000 лет) обеспечивается:

- степенью соответствия вмещающей среды хранилища геологическим критериям выбора площадок;
- возможностью моделировать миграцию радионуклидов на основе известных закономерностей природных геохимических процессов.

Эти оценки можно использовать при анализе условий подземной изоляции радиоактивных продуктов ядерно-взрывных технологий.

3) При долгосрочном прогнозировании рассчитывается риск негативных последствий вероятностных случайных событий или процессов с вероятностными характеристиками. При анализе безопасности рассматриваются и достаточно маловероятные природные события, что соответствует общепринятому принципу: «вероятность существует, как бы мала она не была». Безопасность долгосрочной изоляции обеспечивается совершенствованием горно-технологических разработок в процессе эксплуатации хранилища и достигнутым ко времени его закрытия научно-техническим уровнем, позволяющим уточнять вероятность прогнозируемых событий и необходимость принятия превентивных мер защиты.

Долгосрочным и единственным барьером для радиоактивных продуктов подземных ядерных взрывов является вмещающая геологическая формация. В рассматриваемом случае – соляные массивы и перекрывающие их песчано-глинистые отложения с гравитационно-устойчивой системой подземных вод и насыщенных рассолов.

Второй нерешенной проблемой, постоянно возникающей при выборе площадок и принятии решений о строительстве ПЗРО, является негативное отношение местных властей, общественных организаций и населения к любой деятельности, связанной с радионуклидами или радиоактивностью.

Убежденность технических экспертов – необходимое, но недостаточное условие для реализации геологического захоронения, поскольку проблема имеет не только техническую, но и этическую, социальную и политическую стороны, затрагивающие интересы существующих и будущих поколений [172].

При рассмотрении экологических проблем на общественных слушаньях гипертрофированное внимание уделяется радиации, не соответствующее ее реальному воздействию. Крайне негативную роль в отношении к ядерной энергии и технологиям с использованием радионуклидов имели глобальные последствия Чернобыльской аварии. Широкое распространение радиофобии привело к отказу от ядерной энергии в Германии – стране, которая первая в мире осуществила подземное захоронение РАО в каменных солях шахты Морслебен. Сегодня перспективы развития ядерной энергетики в значительной степени зависят от общественного мнения о радиационном риске.

При оценках приемлемости какой-либо деятельности, в том числе и с использованием радиоактивных веществ, в качестве основного показателя используется определение риска – количественной оценки средней вероятности заболевания или смерти человека за единицу времени, обычно за год. Уровень риска смерти от

различных причин изменяется в широких пределах от 10^{-9} до 10^{-2} за год. Минимальный фиксируемый риск 10^{-9} соответствует отдельным событиям в среде обитания человека, приводящим к гибели нескольких человек во всем мире ежегодно. Деятельность, связанная с риском более 10^{-2} в год, неприемлема. Средний приемлемый уровень риска деятельность в профессиональной сфере равен $2,5 \cdot 10^{-4}$ в год. Максимальный уровень риска за счет загрязнения окружающей среды не должен превышать 10^{-5} в год [173].

Влияние радиофобии привело к тому, что в основе обеспечения ядерной и радиационной безопасности лежит не общераспространенный принцип права «разрешено все, что не запрещено», а иной – «запрещено все, что не разрешено» [174].

В настоящее время о влиянии излучения на человека и окружающую среду известно больше, чем о любых других факторах, вызывающих негативное воздействие. В области обеспечения радиационной безопасности [175]:

- наиболее глубоко разработаны количественные аспекты, включающие характеристики источников опасности, критерии обеспечения безопасности, а также методы и средства защиты;
- накоплен огромный опыт обеспечения радиационной безопасности персонала и населения как при нормальной эксплуатации радиационно-опасных источников, установок и производств, так и при различных авариях и даже катастрофах;
- существуют сложившаяся система широкого международного сотрудничества и взаимодействия.

Из всех факторов техногенного воздействия именно уровень облучения обеспечен наиболее оперативным контролем и жесткими нормами. Радиация – естественный фактор, воздействующий на биосферу в течение миллиардов лет. Уровни естественного радиационного фона варьируют в широких пределах. Органическая жизнь не только адаптировалась к колебаниям ионизирующего излучения, но и в значительной степени излучением сформирована [176].

Анализ безопасности удаления РАО в геологические формации базируется на рекомендациях Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ), в которых рассматриваются различные модели выхода радионуклидов в биосферу и варианты формирования дозовых нагрузок – уровней риска для различных объектов [165]. Накоплен опыт радиационного мониторинга, исследований аварий, усовершенствованы методики, разработаны нормативы, позволяющие оценивать риски для населения и окружающей среды при эксплуатации радиационно-опасных объектов и производств.

Все вышесказанное относится и к аналогам захоронения РАО в геологических формациях – местам проведения подземных ядерных взрывов [152]. При этом секретность «взрывной» тематики предоставила всем желающим безграничные возможности для сочинения запредельных по безграмотности фантазиям о «зонах смерти», «подземных Хиросимах», «экологических катастрофах» [177].

Первое в мире подземной хранилище радиоактивных отходов было создано в каменной соли в Германии в 70-х годах на территории Германской Демократической республики (ГДР). Имея богатый научный и практический опыт исследований соляных формаций, немецкие ученые в ГДР и ФРГ (Федеративной Республики Германия) еще в 60-х годах определили преимущества каменной соли как среды

для подземной изоляции РАО [27, 178]. По сравнению с другими горными породами соляные отложения имеют следующие преимущества:

- низкую пористость и проницаемость;
- высокую пластичность, благодаря которой возможно залечивание разрывных нарушений и изоляция РАО;
- возможность снижения внутренних напряжений за счет ползучести каменной соли (риологические свойства);
- высокая теплопроводность;
- хорошие механические свойства для прохождения горных выработок, стабильных в течение длительного времени;
- большое количество потенциально пригодных соляных структур на территории Германии;
- богатый опыт немецких специалистов, накопленный при создании подземных выработок в соляных породах.

Крупнейший за всю геологическую историю Земли пермский (250-300 млн. лет) солеродный бассейн оставил мощные толщи соляных формаций, размещенные в настоящее время на различных материках и в различных странах. В Германии на территории Северо-Германской низменности расположены многочисленные солянокупольные структуры с первоначальной мощностью соляного пласта 1000-1500 м. Пермские соляные формации (цехштейн) перекрыты мезозойскими и кайнозойскими осадками [27].

Для сооружения могильника для низко- и среднерadioактивных отходов в каменной соли были использованы подземные выработки шахты Бартенслебен, вблизи п. Морслебен в районе г. Магдебурга. Необходимо учитывать, что выбор уже существующих горных выработок не может полностью соответствовать требованиям, предъявляемым к могильнику РАО [164]. Экономически выгодная добыча минерального сырья требует иных геолого-разведочных и горных работ, чем с целью строительства ПЗРО. В частности, в отличие от добычи сырья, сооружение могильника исходит из минимизации числа и размеров горных выработок.

Для обоснования безопасности подземной изоляции РАО необходимы полное представление о внутренней структуре диапира и пространственном расположении различных типов соляных отложений, детальные данные о контактах диапира с вмещающими породами. Для разработки долгосрочного прогноза требуется проведение натуральных геотехнических, теплофизических, гидрогеологических и специальных трассерных испытаний в подземной лаборатории. Выбор соляной формации и шахты был сделан немецкими специалистами на основе анализа имеющихся данных и результатов дальнейших исследований, включающих натурные подземные испытания [27].

Соляная шахта Бартенслебен расположена северо-восточнее горстового массива Гарц в районе Стасфуртского месторождения на Магдебург-Хальберштатском участке. Каменная соль нижнепермского возраста образует здесь диапировую структуру, осложненную двумя антиклинальными складками северо-западного простирания и наложенной складчатостью низших порядков. Пермские галитовые отложения перекрыты кепроком, состоящим в основном из ангидрита и глин. Примеси калийных минералов (карналлита) незначительные и по используемому для хранения РАО участку составляют около 5% по отношению к галиту.

Каменная соль имеет местами полосчатую текстуру, обусловленную чередованием различно окрашенных прослоев чистого галита и галита с примесью суль-

фатов и силикатов (глин). Наряду с участками слоистых солей присутствуют зоны крупнокристаллического чистого галита (зоны перекристаллизации) с размерами отдельных кристаллов до 10-30 см.

Отличительной чертой палеозойских отложений Средней Европы, включая Северо-Германскую низменность является повышенное содержание азота. В районе Стасфуртского месторождения калийных солей содержание азота во включениях уменьшается вверх по геологическому разрезу от карбонатных пород к сульфатным и к каменной соли [179]. В сильвинитах и каменной соли присутствующие газы прочно связаны с кристаллической решеткой и (или) с изолированными микровключениями. Общее содержание газов во включениях составляет 1,1 – 2,9 см³/кг (аналогичная величина для каменной соли Сеитовской структуры 1,1 – 2,3 см³/кг). При этом объемная доля азота каменной соли Стасфуртского района составляет от 94,5 до 99,6 %. Постоянное присутствие азота объясняется поступлением его в осадки из пермской атмосферы, что было подтверждено исследованиями его изотопного состава. Часть азота образуется в результате биогенных процессов. Сохранность во включениях компонента атмосферы древнего солеродного бассейна, существовавшего ~ 270 млн. лет назад, подтверждает стабильность и высокие изоляционные способности каменной соли.

На участке шахты Морслебен соляные отложения перекрыты осадочными песчано-глинистыми породами мезозоя (триас, юра), четвертичными отложениями и осадками плейстоцена. Существующее здесь диапировое поднятие каменной соли в своих периферических частях имеет тектонические нарушения, которые являются зонами разгрузки пластовых вод района. Часть грунтовых вод стекает непосредственно в речную сеть. Дебит и водонасыщенность пластовых зон сравнительно невелики. Гидроизоляция шахтного ствола обеспечивается каменной облицовкой толщиной 60 см. Суммарный приток подземных вод на горизонтах 50 и 170 м составляет ~ 7 л/мин. Накопившаяся вода откачивается из зумпфа один раз в неделю.

До начала 20-х годов прошлого столетия на шахте добывали калийную соль, а до конца 1960-х годов – каменную соль. Во время второй мировой войны в подземных выработках разместился завод по производству оружия. После прекращения добычи соли в 1970 г. весь подземный комплекс был приобретен предприятиями по эксплуатации атомных станций ГДР для захоронения радиоактивных отходов [180].

Соляная шахта практически сухая. Подземные выработки представляют систему штреков и крупных камер размером 100×30×30 м. Общий объем выработок ~ 5 млн. м³. Для хранения РАО используется ~ 20% пустых пространств. Существующие камеры неправильной формы выравниваются. Для размещения контейнеров и дополнительных подъездных штреков проведены очистные работы в старых горных выработках. В первую очередь были использованы камеры объемом около

10 тыс. м³ самого глубокого четвертого горизонта – уровень 506 м. Технология захоронения включает захоронение твердых РАО и захоронение жидких РАО, отверждаемых на месте буроугольными золами [164]. Предприятие получило название «Подземное хранилище для радиоактивных отходов Морслебен».

Твердые отходы захоронены в бочках, размещенных в подготовленных подземных камерах, изолируемых первоначально от основных выработок каменной кладкой (рис. 75).



Рис. 75. Размещение РАО в подземных камерах хранилища Морслебен. Пустые пространства между бочками заполняются измельченной каменной солью.

Среднеактивные твердые отходы хранятся в контейнерах объемом от 200 до 570 л на глубине 500 м в бывших выемочных камерах или специально для этого выработанных пространствах.

В 1971 году захоронение отходов началось в тестовом режиме проведения экспериментов в условиях подземной лаборатории. В 1986 г. было получено разрешение на уровне правительственных органов ГДР, и началась постоянная эксплуатация хранилища. После воссоединения Германии возник недолгий перерыв, но в течение 1994-1998 гг. захоронение отходов продолжалось.

Всего на шахте Морслебен захоронено 6621 источник ионизирующего излучения и $\sim 37000 \text{ м}^3$ радиоактивных отходов. Общая активность β/γ -излучения $5 \cdot 10^{14}$ Бк (на 2005 г.) и α -излучения $7,5 \cdot 10^{11}$ Бк [181]

В 2009 г. Федеральное ведомство Германии по защите от радиации утвердило проект для консервации могильника Морслебен, который предусматривает наряду с закладкой пустот вокруг упаковок с отходами, провести изоляцию выработок заполненных РАО специальными изолирующими перемычками («плотинами»). Проведение изоляции и консервации существующих участков размещения РАО от остальных выработок снизит вероятность выхода радионуклидов за пределы комплекса инженерных барьеров. Проведенные в 2011 г. испытания показали, что используемые материалы и технологии полностью отвечают поставленным требованиям [180].

В шахте Морслебен проведен большой объем комплексных натурных исследований. В частности, проведены испытания по изучению условий изменения каменной соли под влиянием тепловыделяющих отходов [131].

Проведенные эксперименты показали разнонаправленный характер миграции газовой-жидких включений: содержащих газ – от теплового источника; жидких

включений – по направлению к источнику тепла. Установлено, что при прогреве пород до 200°C вокруг контейнера образуется зона уплотнения каменной соли, препятствующая и защищающая его от проникновения корродирующих растворов и радиолитических газов. Следует допустить, что уплотнение вызвано удалением межкристаллических газовой-жидких включений в контактной зоне прогрева каменной соли (см. раздел 1.5.1.).

В 75 км западнее Магдебурга в отработанной соляной шахте Ассе вблизи Вольфенбюттель (земля Нижняя Сасония) на территории Федеративной Республике Германии (ФРГ) в 1967 г. проведено опытное захоронение низкоактивных РАО [181]. Шахта заложена в крупном соляном диапире. Характер вмещающих соляных пород и геологические условия сопоставимы с шахтой Морслебен.

Ранее в шахте с 1906 по 1964 гг. производилась разработка калийных и каменных солей на глубинах 500-750 м.

В шахте Ассе проводился обширный комплекс научных исследований и технологических испытаний по обоснованию захоронения в соляные купола высокоактивных отходов. Были осуществлены крупные, в том числе международные программы натурных испытаний по облучению, разогреву, механическим испытаниям каменной соли, коррозии металлов и пр. Исследования включали тестовые захоронения с последующей выемкой контейнера с реальными остеклованными РАО. Проведены комплексные геологические исследования соляных структур участка с 3-мерным моделированием результатов геолого-геофизической разведки с помощью программного пакета “OpenGeo 5”.

В период с 1967 по 1978 гг. на глубине 750 м захоронено 125 000 бочек с низкоактивными и 1 300 бочек со среднеактивными отходами. Общий объем отходов составил ~ 42 тыс. м³, общая активность РАО – $3,1 \cdot 10^{15}$ Бк (январь 2002 г.).

По сравнению с шахтой Морслебен, подземные выработки шахты Ассе оказались менее надежно изолированными от подземных вод. В связи с поступлением рассолов и возможностью нарушения герметичности упаковок РАО Отделом по радиационной защите (BfS) было принято решение об извлечении всех отходов. Планируются постадийные процессы бурения скважин, открытие камер захоронения и пробное извлечение упаковок. Одновременно разработаны варианты сооружения новой шахты, строительство как наземных установок по кондиционированию и хранению отходов, так и подземных технических установок и инфраструктуры.

В настоящее время в соответствии с немецким атомным законодательством объекты «Ассе» и «Морслебен» находятся на стадии консервации [182].

Соляной диапир Горлебен был выбран в качестве перспективной площадки для строительства подземного хранилища РАО в 1978 г. специалистами Федерального ведомства по геонаукам и природным ресурсам (BGR) после анализа свыше 200 соляных структур Нижней Саксонии [178]. Участок располагается в округе Данненберг-Люхов в прибрежной части р. Эльба (~ 125 км к северо-северо-западу от Магдебурга).

Для определения условий залегания диапира, его взаимоотношений с вмещающими осадочными породами, гидрогеологического режима и пр. проведены геологоразведочные работы на общей площади около 300 км² [183]. Пробурены 4 опорные скважины глубиной до 2000 м для изучения соляного диапира, 44 скважины в зоны контакта диапира с вмещающими породами, 471 скважина глубиной от 10 до 275 м для изучения гидрогеологических условий и 2-е скважины на месте

расположения двух шахтных стволов. В скважинах проводился стандартный геофизический каротаж, а также нейтронные, сейсмические, геоэлектрические и акустические исследования. В 1984 г. проведено сейсмическое изучение участка на 16-ти профилях вдоль и поперек простирания соляного диапира. По результатам разведочных работ на поверхности участка дана предварительная оценка долгосрочной безопасности захоронения РАО в соляной структуре Горлебен.

Материнский соляной пласт солей пермского возраста залегает на глубине более 3000 метров. Формирование диапира происходило в течение длительного времени. Соляные массы прорывали перекрывающие мезозойские отложения (юрские, меловые), выходили на поверхность, неоднократно размывались с последующим образованием защитного ангидритового кепрока. Сложная и длительная история развития отразилась на внутреннем строении соляного диапира, состоящего из перемещенных и деформированных пластов различных по составу и структуре солевых пород и ангидритовых прослоев [184]. В настоящее время диапировая структура перекрыта осадочными породами третичного возраста и четвертичными флювиогляциальными породами (рис. 76) [185].

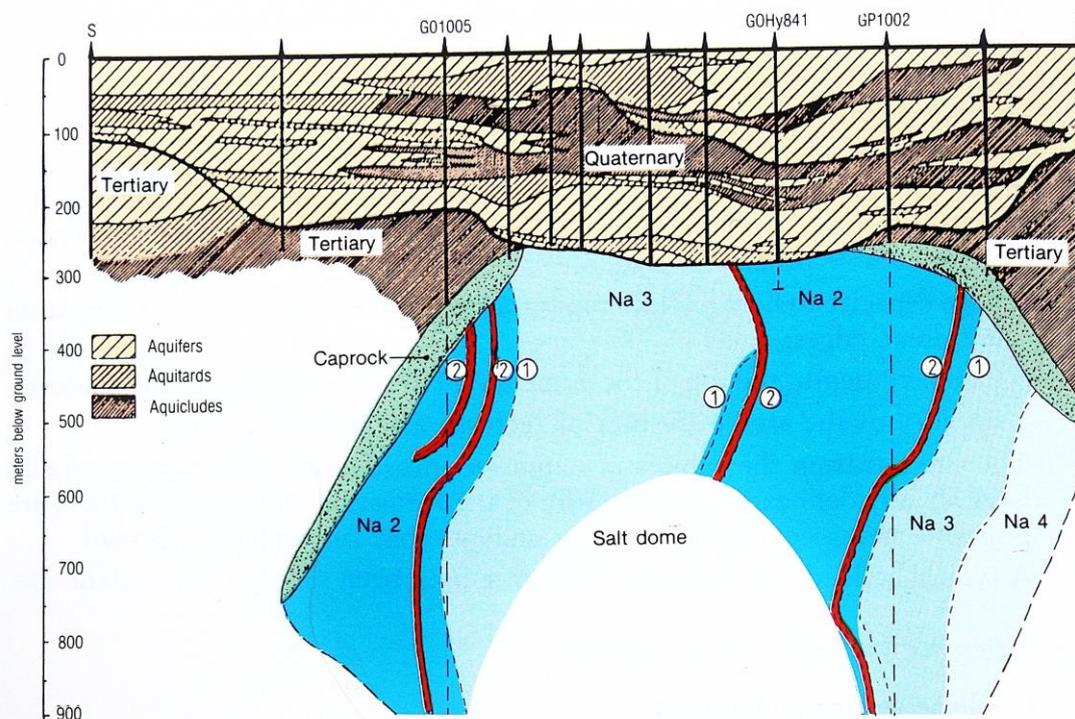


Рис. 76. Геологический субмеридианальный разрез верхней части соляного диапира Горлебен [185].

Соляной массив (salt dome) состоит из различных слоев (обозначены номерами 1, 2, 3 и Na 2 – Na 4) и перекрыт породами кепрока (caprock). Выше каменной соли залегают третичные (tertiary) и четвертичные (quaternary) отложения в различной степени обводненные или водоупорные: водоносные (aquifers), водосодержащие (aquitards), водоупорные (aquicludes). G01005 – код разведочных скважин.

Более детальные данные о геологической структуре диапира, условиях залегания разновидностей соляных пород, их геомеханических, термомеханических и гидравлических свойствах на выбранном участке были получены после проведения подземных разведочных работ и натурных испытаний «in situ» (рис.77).



Рис. 77. Натурные испытания в шахте Горлебен. <http://tfolk.ru/?p=4236> (время обращения 03.06.2013).

При проходке двух шахт в породах кровли диапира применялся метод замораживания. В пределах разведанного участка (ЕВ-1) выделен крупный объем потенциально пригодных пород (формация Hauptsalz) в пределах сравнительно простой внутренней антиклинальной структуры диапира. Характеристика каменной соли на южном участке приведена в табл. 56 [185].

Таблица 56. Характеристика состава и физических свойств каменной соли на южном участке диапира Горлебен [185].

Характеристики	Величина
Состав, %:	
– галит	87
– ангидрит	7
– глины	4
– карналлит	2
Плотность (20 °С)	2,16 т/м ³
Пористость	< 0,04
Гидропроницаемость (при 14 МПа)	< 6 · 10 ⁻¹⁸ м ²

Собранная детальная информация была использована для доказательства пригодности соляной структуры для захоронения РАО, разработки концепции проектируемого хранилища и планирования его строительства. Одновременно была подготовлена окончательная экспертиза участка, которая включала [183]:

- геонаучную оценку пригодности на базе геологических и геотехнических данных о вмещающих породах;
- экспертизу технических возможностей реализации безопасной эксплуатации могильника и необходимых инженерно-геологических барьеров;
- перечень требований к радиоактивным отходам и контейнерам;

– долгосрочную оценку безопасности могильника, учитывая все возможные изменения условий.

С 2000 по 2010 год работы на шахте Горлебен были приостановлены в результате введения федеральным правительством моратория на такие исследования [182]. При этом не были поставлены под сомнение результаты проведенных геологических исследований, определяющих пригодность соляной структуры Горлебен. Правительство приняло решение о целесообразности использования площадки для подземной изоляции РАО, и не позднее 2004 г. решить вопросы, поднятые во время моратория [186]. Энергетические компании не считают, что выяснение этих вопросов поставит под сомнение пригодность площадки Горлебен и ее исследования будут продолжены. В октябре 2010 года работы по исследованию площадки для подготовки лицензионной заявки возобновились.

В течение 1980-1990 гг. на участке размещения шахты был выполнен большой объем научно-исследовательских работ и технических испытаний соляного массива. Кроме того, создана крупная наземная инфраструктура с целевым назначением на доставку, разгрузку и первичную подготовку РАО.

На территории Германии площадка Горлебен до последнего времени имеет самый высокий статус по уровню исследований и степени технического развития.

Начиная с 2011 г. компанией DBE TECHNOLOGY разрабатывается проект по захоронению в Горлебене радиоактивных отходов с высоким уровнем тепловыделения и отработавшего ядерного топлива [182]. Особое внимание немецкие специалисты уделяют изучению изменений каменной соли под влиянием тепловых процессов [131].

В Германии соляные формации остаются наиболее перспективной геологической средой для решения проблемы окончательной изоляции радиоактивных отходов различного состава и уровня активности. Однако, выбор солянокупольных структур диапирового типа является не лучшим вариантом для строительства подземных хранилищ. Каменная соль в ядрах таких структур интенсивно дислоцирована. В процессе своего перемещения стратифицированные соляные пласты перемяты и разорваны. Углы падения слоев изменяются от незначительных до вертикальных, а некоторые прослои запрокинуты. Сложность геологического строения соляных структур создавала трудности для их изучения, а также в процессе сооружения хранилищ.

Определились и другие проблемы использования для захоронения РАО отработанных соляных шахт. Начальное несоответствие определяется различием планировки и количества выработок для экономически выгодной добычи каменной соли и минимизации числа подземных камер для размещения отходов. Кроме того, горнодобывающие предприятия являются, как правило, градообразующими, и размещение потенциально опасных объектов вызывает резкое противодействие местного населения. Это наглядно показали события в районах Морслебена, Горлебена, Ассе. Ситуация в Германии осложнена распространенной среди населения боязнью излучения (радиофобией) [168].

В США для строительства подземного хранилища РАО – пилотной установки WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) выбраны пластовые залежи каменной соли формации Саладо, входящей в Делавэрский соляной бассейн нижнепермского возраста. Делавэрский бассейн – один из крупнейших в Северной Америке (рис.78). Он расположен на территориях штатов Техас, Оклахома, Канзас и Нью-Мексико

[187]. WIPP рассматривается как репозиторий (хранилище) для геологического захоронения трансурановых отходов ядерного оружейного комплекса. К ним относятся отходы, образовавшиеся:

- в радиохимическом производстве оружейного плутония;
- при производстве ядерных боеголовок;
- в процессах демонтажа ядерных боеголовок;
- при очистке площадок ядерных военных центров США.

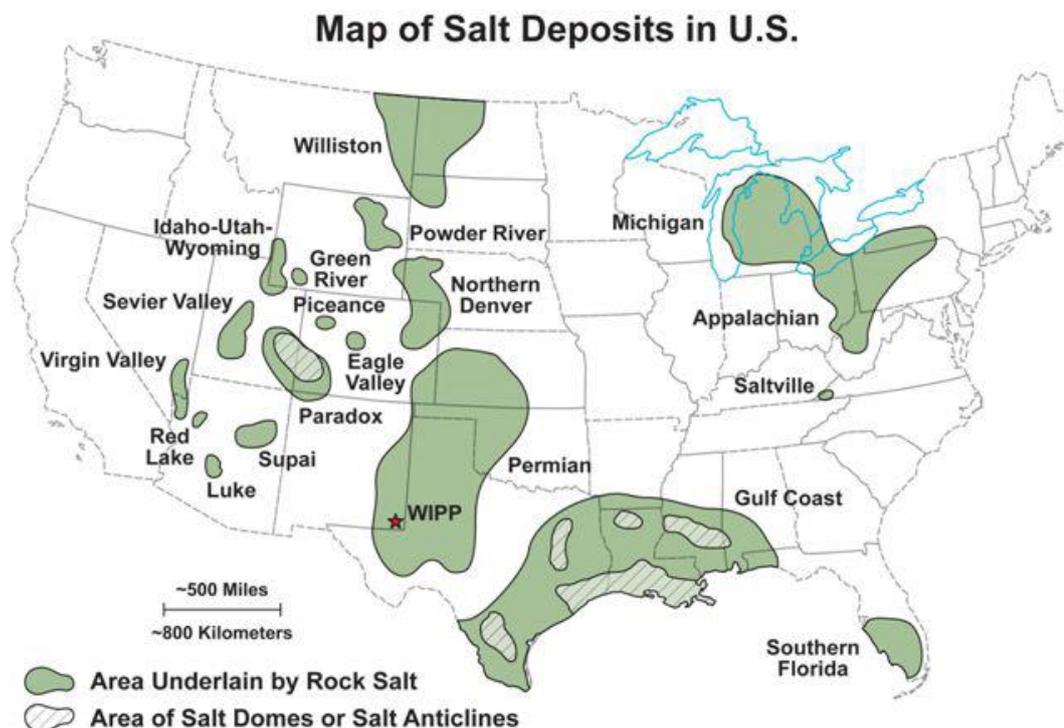


Рис. 78. Соляные отложения на территории Соединенных Штатов Америки [187]. Цветными контурами выделены пластовые отложения каменной соли, штриховкой – области развития соляных куполов и антиклиналей.

Размещаемые на WIPP отходы должны удовлетворять некоторым «критериям признания отходов». Они должны иметь активность, превышающую 100 нанокюри (3700 Бк) на грамм отходов, которую дают альфа-излучающие радионуклиды с периодом полураспада свыше 20 лет. Под эти критерии, помимо прочих, попадают уран, нептуний, плутоний и америций.

Хранилище WIPP расположено на юго-восточном окончании штата Нью-Мексико вблизи места проведения в 1961 г. первого подземного ядерного взрыва «Гном». Геологические исследования, предшествующие выбору площадки для взрыва дали начальную информацию ее перспективности для подземной изоляции РАО. Однако для строительства установки WIPP понадобились длительные комплексные исследования, подтверждающие ее безопасность [15].

Аргументами в пользу площадки в штате Нью-Мексико были:

- мощность пласта каменной соли более 900 м;
- сейсмическая и тектоническая стабильность района;
- сохранность без изменений соляных отложений в течение ~ 270 млн. лет;
- отсутствие циркулирующих подземных вод;

– отсутствие в районе глубоких скважин, которые обычно бурят при поисках нефти или другого сырья.

На участке строительства каменная соль перекрыта алевролитами и песками плейстоценового возраста до глубины ~ 30-40 м и красноцветными отложениями алевролитов, песчаников и сланцев триаса (формация Rustler) до глубины ~ 180-190 м. Отложения каменной соли перекрыты продуктами выветривания – глинистыми сланцами и доломитом мощностью ~ 50 м [186]. Параметры пород на участке “WIPP” приведены в табл. 57 [188].

Таблица 57. Свойства пород на участке строительства установки “WIPP” [188].

Тип пород	Гидравлическая проводимость, см/с		Пористость, %
	Среднее	Вариации	
Пески, гравий, илистые осадки	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-2}$	20
Известковый сланец, частично пески	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-3}$	13
Песчаники	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-2}$	20
Доломиты	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-2}$	20
Сланцы, переслаивающиеся с глинами, частично известковые	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-3}$	13
Кремнистый сланец	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-3}$	20
Доломиты с ангидритом	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-3}$	20
Переслаивающиеся сланцы и доломиты	$6,8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-3}$	20
Каменная соль	$2 \cdot 10^{-18}$	$2 \cdot 10^{-21} - 1 \cdot 10^{-8}$	0,5

Геологическое строение рассматриваемого района сравнительно простое с горизонтальным залеганием осадочных и осадочно-хемогенных пород. Это южная часть Делавэрского калиеносного бассейна, расположенного в полупустынном районе, в пределах юго-восточной части штата Нью-Мексико и юго-западной части штата Техас [149]. Калийные соли обнаружены в 20-е годы прошлого столетия. В 1931 г. начало эксплуатироваться Карлсбадское месторождение. Калиеносный горизонт приурочен к верхней части формации Саладо, на глубине 244-457 м. Мощность горизонта ~ 75 м. Он распространен на площади 2330 км², а промышленный пласт – на площади ~ 800 км². Добыча ведется камерно-столбовой системой и длинными забоями с обрушением кровли. Применяются буровзрывные и комбайновые способы отбойки руды.

В процессе проведения поисково-разведочных и эксплуатационных работ были выполнены комплексные исследования карлсбадского участка и прилегающих территорий. Получена информация о свойствах соляного пласта формации Саладо, о гидрогеологических особенностях района, горно-технические и другие данные.

Ранее детальные геологические исследования этого же района были проведены во второй половине 50-х годов в связи с поисками площадки для проведения подземного ядерного взрыва в каменной соли [15]. При этом изучались особенности миграции радионуклидов в геологических структурах района, оценивались

возможности радиоактивного загрязнения подземных вод, т.е. те же вопросы, которые позднее в полном объеме были представлены для характеристики участка WIPP.

Уровень изученности региона позволял прогнозировать сравнительно спокойное тектоническое развитие платформенного региона и его геологических структур, без нарушения изоляции долгоживущих радионуклидов в соляном пласте пермского возраста. Наиболее вероятным негативным фактором является эрозия перекрывающих пород водными потоками тающих ледников, которые могут образоваться в Северном полушарии в сравнительно близком геологическом будущем. Деградация последнего висконсинского оледенения началась около 20 тыс. лет назад и закончилась на материке 6500 лет назад. Граница ледниковых масс достигала 40° северной широты, т.е. располагалась на значительном расстоянии от WIPP (~ 800 км).

Нормальный сценарий геологического развития в качестве основного механизма миграции радионуклидов рассматривает диффузию [188]. В соляном массиве средний коэффициент диффузии составляет $1 \cdot 10^{-10}$ см²/с, при котором миграция радионуклидов на расстояние 100 м произойдет за 500 млн. лет. Рассмотрены маловероятные или «аномальные» (abnormal) сценарии разрушения хранилища. В частности, размыв перекрывающих соляных пород (~ 350 м) пресными водами, для чего потребуется не менее 1,35 млн. лет.

Глубина подземных выработок хранилища WIPP ~ 650 м, на ней размещены 8 секций, соединенных туннелями, а каждая секция состоит из 7 камер. Всего первоначально планировалось создать 56 камер длиной 91,5 м, шириной 10 м, высотой – 4 м [15] (рис. 79).

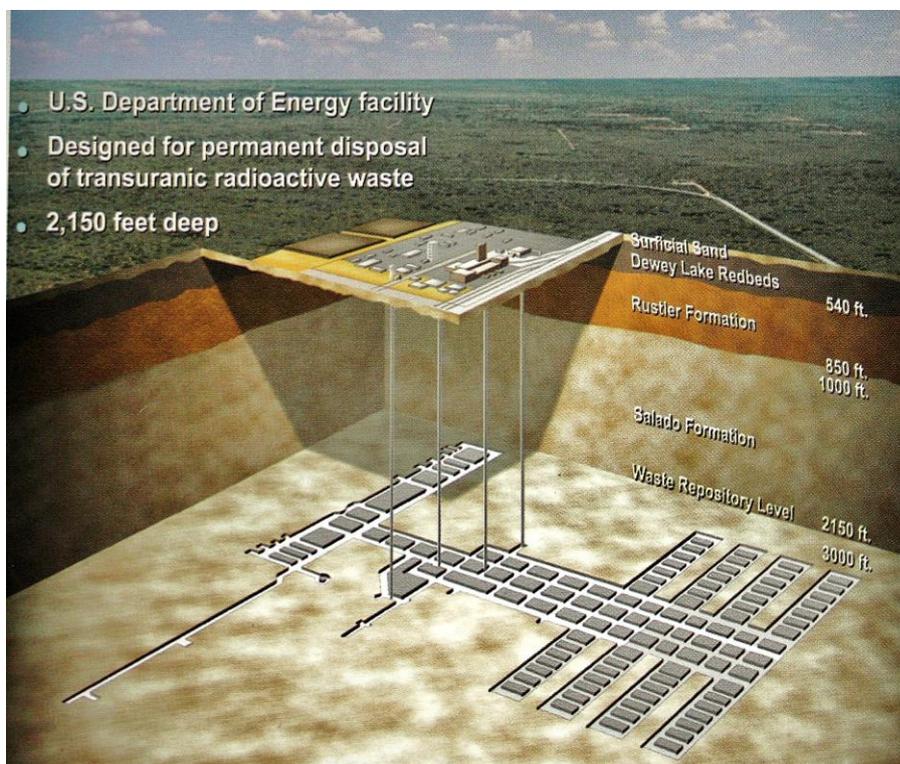


Рис. 79. Схема расположения подземных выработок шахты “WIPP” [189].

На поверхности на участке площадью $\sim 0,14 \text{ км}^2$ расположены несколько шахтных стволов:

- ствол для загрузки упаковок с отходами, который соединяет здание обработки РАО с центральным подземным тоннелем (ствол с бетонной облицовкой диаметром 6,4 м);
- ствол для подъема раздробленной каменной соли, образовавшейся в процессе проходки подземных выработок;
- вентиляционный ствол для подачи воздуха;
- вентиляционный ствол (диаметр 4,3 м) для удаления воздуха из шахты через систему очистки в здание на поверхности.

Начиная с 1982 года специалистами США, в основном лаборатории Сандия, проведен большой объем натурных испытаний с целью моделирования условий изоляции РАО в течение длительного периода времени [15].

Основные направления исследований:

- геохимическая оценка WIPP, т.е. всей системы подземной изоляции РАО, включающей горные выработки, пласт каменной соли и геологическое окружение;
- определение риолитических свойств пластовой каменной соли, скорость конвергенции подземных выработок;
- теплофизические испытания;
- изучение полей напряжений соляного пласта;
- выбор способов и материалов засыпки пустых пространств и герметизации камер;
- изучение поведения конструкционных материалов в соляной шахте;
- изучение газообразования и возможности воспламенения упаковок с отходами и влияния этих процессов на условия изоляции;
- изучение барьерных свойств вмещающей среды;
- изучение поведения коллоидных частиц в моно- и полифазных системах.

Создание и получение разрешения на эксплуатацию ПЗРО в геологических формациях является не только сложной научно-технической задачей, но и требуют выполнения многочисленных нормативно-правовых актов [190].

Основным нормативным документом, регулирующим обращение с РАО в США, является Закон о политике в области ядерных отходов (Nuclear Waste Policy Act, далее – NWPA), принятый Конгрессом в 1982 г. Согласно NWPA, федеральным ведомством США, ответственным за проектирование строительства и эксплуатацию будущих хранилищ, назначался Департамент энергии (Department of Energy, далее DoE). NWPA определяет принципы и порядок правовых действий, касающихся создания геологических хранилищ РАО. DoE подготавливает все документы, необходимые для получения разрешения на строительство и лицензий на эксплуатацию хранилищ, и представить их Комиссии по ядерному регулированию (Nuclear Regulatory Commission). На Комиссию, помимо рассмотрения документов и, в случае их одобрения, выдачи соответствующих разрешений и лицензий, возлагается правовое регулирование действий, связанных с будущей эксплуатацией хранилища.

По правилам США к трансураниевым отходам (TRU) относятся [191]:

- отходы контактно обрабатываемые (Contact Handled, CH) с мощностью дозы на поверхности контейнера меньше 200 мбэр/час (2 мЗв/час) при средней величине ~ 5 мбэр/час;
- отходы дистанционного обращения (Remote Handled, RH) с мощностью на поверхности контейнера до 1000 бэр/час (для сравнения, боросиликатное стекло с ВАО дает мощность дозы на поверхности контейнера до 30 000 бэр/час).

Перечень преобладающих по количеству радионуклидов в двух типах трансурановых отходов представлен в табл. 58 [191].

Таблица 58. Состав радионуклидов в двух типах трансурановых отходов, Ки/м³ [191].

Радионуклид	Контактные отходы, CH	Дистанционные отходы, RH
Am-241	2,62	0,842
Ba-137m	$4,53 \cdot 10^{-2}$	28,9
Cm-244	0,187	$4,45 \cdot 10^{-2}$
Co-60	$3,83 \cdot 10^{-4}$	1,47
Cs-137	$4,78 \cdot 10^{-2}$	30,5
Pu-238	15,5	0,205
Pu-239	4,66	1,45
Pu-240	1,25	0,715
Pu-241	13,7	20,0
Sr-90	$4,07 \cdot 10^{-2}$	29,5
Y-90	$4,07 \cdot 10^{-2}$	29,5

В подземных камерах WIPP планируется разместить 176 000 м³ (850 000 бочек объемом 208 л) с CH, разместив их штабелями на полу камер (рис. 80). Отходы дистанционного обращения (7500 канистр) вводятся в горизонтальные облицованные скважины, пробуренные на расстояниях 2,4 м друг от друга в стенах камер складирования (рис. 81).

В качестве изолирующих наполнителей используются цементы, бентонитовые глины, измельченная каменная соль, асфальтобитумные смеси [187].

Захоронение радиоактивных отходов в США регламентируется Федеральными правилами, в которых приведены благоприятные и неблагоприятные факторы, определяющие выбор площадок для геологических могильников, например, для ВАО [192]. При этом наряду с качественными характеристиками геологической среды приведены количественные параметры: глубина заложения не менее 300 м, время перемещения подземных вод из могильника в биосферу должно превышать 1000 лет и пр. Для принятия решений требуется определенный набор количественных оценок не только по существующим условиям могильника, но и прогнозируемым [187]. Например, для демонстрации безопасности WIPP необходимо было доказать, что подземные воды не будут загрязнены захороненными РАО и не вызовут опасность для окружающей среды. Возможность переноса долгоживущих радионуклидов подземными водами была одной из множества оценок стабильности WIPP.

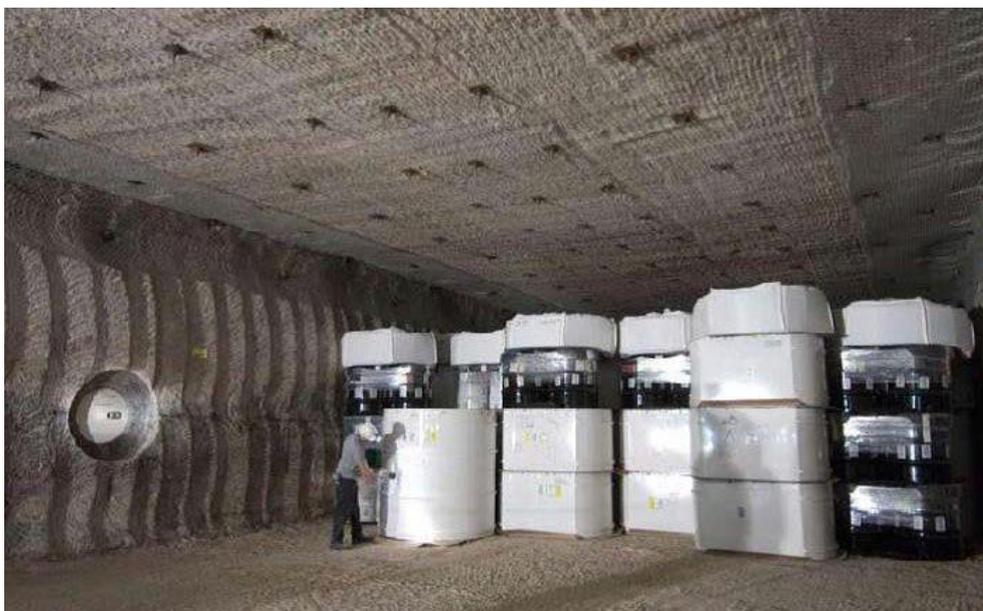


Рис. 80. Размещение контактно обрабатываемых отходов (СН) в подземных камерах WIPP [187].

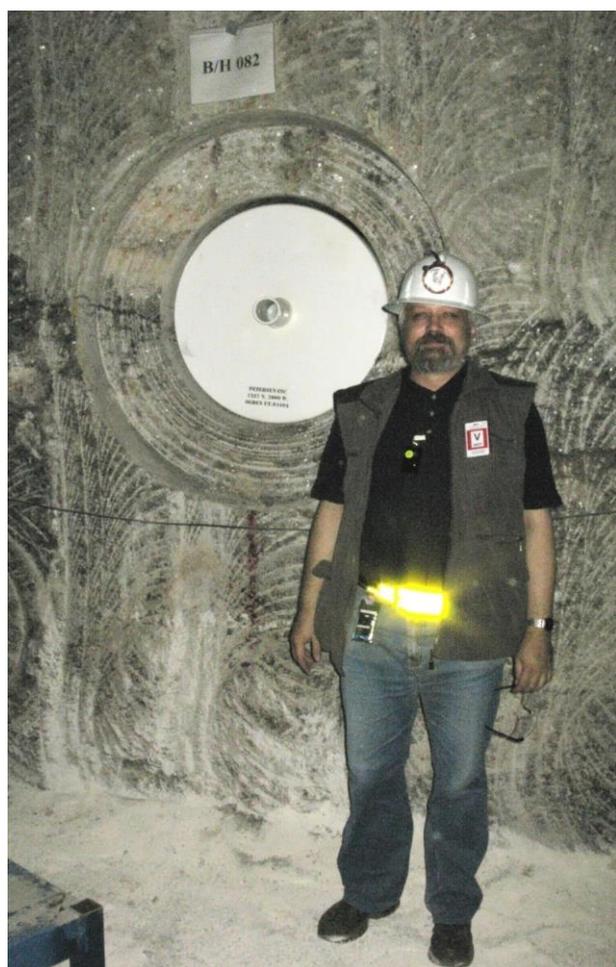


Рис.81. Устье горизонтальной скважины для размещения отходов дистанционного обращения (РН). Авторское фото.

Комплексное изучение района и зоны подземного строительства проводилось в течение 20 лет. Для геоэкологического и горно-технического мониторинга использовались прямые и дистанционные методы снятия информации по различным параметрам. Полномасштабные натурные испытания проведены в подземных выработках [15]. Результаты исследований полностью подтвердили заключение Комитета по захоронению отходов Национальной Академии наук, сделанное еще в 1957 г., о том, что каменная соль является лучшей геологической средой для захоронения высокоактивных отходов. Основным преимуществом этих пород следует считать [187]:

- отсутствие циркулирующих вод в соляных породах;
- способность каменной соли залечивать разрывные нарушения;
- процессы конвергенции, со временем ликвидирующие пустые пространства подземного хранилища, которые будут «запечатаны» в соляном пласте.

Залежи каменной соли имеют природные барьеры, сохраняющие гидрогеологическую стабильность соляных формаций в течение сотен миллионов лет. Су-

существующие природные барьеры должны надежно изолировать радионуклиды, размещенные в каменной соли.

Для конкретной площадки WIPP выбран регион с низкой сейсмической активностью, что позволяет прогнозировать сохранение существующих условий подземной изоляции на длительные сроки. В районе размещения WIPP не были обнаружены полезные ископаемые (бурение на нефть, газ). Сама каменная соль является полезным ископаемым, однако ее мировые запасы настолько велики, что выделение сравнительно небольшого по объему горного отвода для WIPP не должно вызвать беспокойство ни с позиции соляной промышленности, ни с позиции общей экономики человечества в целом.

Разрешение на строительство было получено после многолетних научных дискуссий, общественных обсуждений и споров вокруг вопросов регулирования. В разработке нормативно-правовой базы WIPP участвовали большое количество государственных, региональных и общественных организаций: Агентство по защите окружающей среды, Комиссия по ядерному регулированию, Министерство транспорта, Управление по безопасности и охране труда и пр. По разработанным правилам могильник должен в течение 10 000 лет сохранить следующие характеристики [190]:

- Защита могильника должна обеспечивать суммарную эквивалентную дозу, не превышающую установленный предел в 15 мБэр (150 мкЗв) с учетом всех потенциальных путей распространения радиации и в расчете на облучение любого представителя населения.
- Загрязнение источников питьевой воды радионуклидами и/или опасными компонентами из смешанных отходов должно сохраняться на уровне, допускаемом национальными стандартами на питьевую воду.
- Соблюдение ограничений на выбросы из могильника в окружающую среду:
 - за счет миграции с подземными водами;
 - за счет диффузии радиоактивных газов;
 - за счет природных процессов (землетрясений, вулканической деятельности и пр.) или человеческого фактора (буровые, экскавационные и др. работы в зоне могильника);
- Смешанный характер отходов, присутствие в них опасных химических веществ (в основном органики) потребовало расширения перечня компонентов, попадающих в сферу длительного мониторинга.

Для проверки результатов оценки долговременной безопасности могильника с позиций геологии, геохимии, материаловедения, радиационной защиты, ядерной безопасности была организована группа экспертов с участием представителей МАГАТЭ.

В 1999 г. началась эксплуатация WIPP. Предполагается, что работы по размещению отходов продлятся до 2070 г. Активный мониторинг состояния хранилища предусматривается на последующие 100 лет.

Равнинный, полупустынный рельеф позволял без осложнений спланировать на местности и выделить площадку промзоны, а также охраняемую и контролируемую зоны WIPP. Выделены участки для размещения каменной соли, накапливающейся после проходки подземных выработок. Построен комплекс для приема РАО, системы контроля, пункт дезактивации оборудования и транспорта и пр. Проложено 18 км подъездных путей для трейлеров с тяжелыми контейнерами, соединяющих WIPP с федеральной трассой. Используемые технологии и природные

условия района позволяли минимизировать степень антропогенной модификации при строительстве крупного хранилища радиоактивных отходов.

В 2010 г. по результатам выполнения комплексных гидрогеологических и экологических программ было показано, что деятельность WIPP не имеет негативных воздействий на здоровье людей и окружающую среду [81]. Радиоэкологическая часть программы включала исследования:

- воздушных выпадений;
- биоты;
- водных стоков;
- подземных вод;
- осадков;
- почвы;
- поверхностных вод.

Изучение объектов окружающей среды не ограничивалось границами охраняемых и защитных зон WIPP. Отбор отдельных проб производился по всему району на расстояниях до 100 км от технологической площадки. В табл. 59 приведены результаты анализа почв на юго-восточном участке контролируемой зоны [81].

Таблица 59. Распределение радионуклидов по глубине в почвах юго-восточного участка контролируемой зоны [81].

Радионуклид	Глубина отбора проб, см	Содержание, Бк/г
$^{233,234}\text{U}$	0 – 2	$1,17 \cdot 10^{-3}$
- " -	2 – 5	$1,18 \cdot 10^{-3}$
- " -	5 – 10	$1,55 \cdot 10^{-3}$
^{238}U	0 – 2	$1,16 \cdot 10^{-3}$
- " -	2 – 5	$1,12 \cdot 10^{-3}$
- " -	5 – 10	$9,98 \cdot 10^{-4}$
^{40}K	0 – 2	$2,06 \cdot 10^{-1}$
- " -	2 – 5	$1,81 \cdot 10^{-1}$
- " -	5 – 10	$2,21 \cdot 10^{-1}$
^{137}Cs	0 – 2	$3,42 \cdot 10^{-3}$
- " -	2 – 5	$1,96 \cdot 10^{-3}$
- " -	5 – 10	$1,23 \cdot 10^{-3}$

В 2011 и в 2012 гг. Карлсбадское отделение Министерства энергетики США, которое обеспечивает надзор за WIPP, получило премии за успешное выполнение части общей программы экологического департамента штата Нью-Мексико [193].

Возможность сооружения и успешная эксплуатация практически первого в мире специально созданного могильника для радиоактивных отходов WIPP определялись несколькими исходными составляющими, позволившими реализовать проект в целом [15, 187]:

- проведением комплексных многолетних научных исследований каменной соли и соляных формаций как геологической среды для подземной изоляции РАО;
- использованием в качестве крупномасштабного техногенного аналога подземного взрыва «Гном», проведенного в 1961 г. вблизи площадки WIPP в каменной соли формации Саладо;

- выбор площадки WIPP проведен в полном соответствии с требованиями критериев МАГАТЭ с дополнениями для конкретных условий хранилища (“waste acceptance criteria”);
- геологические условия соляного пласта позволяли выбрать оптимальный вариант сооружения подземных выработок хранилища и размещения различных РАО;
- окончательный выбор участка и оценка безопасности подземной изоляции РАО были получены после осуществления комплексных натуральных испытаний в подземной лаборатории WIPP;
- в условиях малой заселенности района и проводимой социально-информационной политики были ликвидированы разногласия с руководством штата и населением (с момента начала эксплуатации WIPP штат Нью-Мексико получает ежегодно 20 млн. долларов на улучшение инфраструктуры и дорог);
- детальные исследования природной среды, проводимые в течение 10-летней эксплуатации WIPP, подтвердили сделанные ранее выводы о его безопасности;
- положительным фактором является доступность научной и оперативной информации, связанной с деятельностью и планами WIPP.

К 2012 году большое количество трансурановых отходов крупнейших лабораторий и предприятий США (Айдахо, Сандия, Лос-Аламос, Саванна-Ривер, завод Rocky Flats и др.) было вывезено и размещено в подземных камерах WIPP [194-196].

Исследования, проведенные в процессе подготовки строительства и позднее в период эксплуатации WIPP, доказали безопасность размещения в пластовой залежи каменной соли трансурановых отходов. Сделанные выводы определили перспективу строительства рядом с WIPP централизованного хранилища ОЯТ [197]. Это позволит в 2020-2030 годах изолировать под землей около 6000 тонн ОЯТ и «покончить с ненужными затратами на приреакторное хранение, очистить от топлива все выведенные из эксплуатации объекты и уменьшить количество топлива в бассейнах выдержки». Последнее должно увеличить безопасность хранения ОЯТ, поскольку после аварии на АЭС «Фокусима» специалисты опасаются, что при аварийном обесточивании может произойти испарение бассейнов выдержки с крайне опасными последствиями.

Создание и успешное функционирование хранилища WIPP не означало решения всех проблем эксплуатации хранилища трансурановых элементов в геологических формациях. В частности, существовали определенные противоречия в нормативно-правовых документах.

Основным нормативным актом, разработанным Агентством по защите окружающей среды и Комиссией по ядерному регулированию, является Кодекс федеральных постановлений (Code of Federal Regulations, далее – CFR). В нормативные акты CFR входят совместные формулировки, предложенные Агентством и Комиссией. При этом в одном нормативном акте могут присутствовать вероятностные и количественные критерии, разработанные Агентством, и качественные ограничения свойств геологической среды, требуемые Комиссией. Естественно, что эти обстоятельства привели к внутренним противоречиям документа [198].

Современный уровень научных знаний не может обеспечить адекватный эмпирический базис для получения вероятностных показателей, характеризующих способность изолировать радионуклиды в течение 10 тыс. лет. В результате всех рас-

четов будет получена вероятностная величина. Например, для оценки вероятности землетрясений, нарушающих целостность ПЗРО, используют наблюдения за прошедшие 200 лет. Для строгого экстраполяции существующих наблюдений на будущие 10 тыс. лет нет строгих научных обоснований. Однако юридически даже чисто теоретическое, спекулятивные рассуждения могут быть приняты по «степени достаточной разумности».

В письме Комиссии, направленном в 1990 г. в адрес Агентства, говорилось: «Численные оценки вероятностей или частот совершения тех или иных событий в отдаленном будущем могут вообще не быть значимыми. Комиссия полагает, что идентификация и оценка таких событий и процессов будут требовать привлечения ряда гипотез, при этом их количественные показатели, полученные с помощью вероятностно-статистических методов, неизбежно включают в себя существенные неопределенности» [198].

В течение 1992-1996 гг. разрабатывались различные варианты концепции геологического захоронения РАО, сближающие позиции различных ведомств.

Очевидно, что законодательно-нормативные осложнения исходили из противоречий, возникших при осмыслении результатов научных исследований, проводимых при оценках безопасности изоляции РАО в геологических формациях. Позиция специалистов Управления по обращению с радиоактивными отходами была опубликована в 1990 г. [166].

В представленной публикации указывалось, что основные противоречия связаны с оценками надежности долгосрочного прогнозирования безопасности изоляции РАО в геологические формации. Прогнозирование геотехнологической системы подземной изоляции РАО на 10 000 лет и более соответствует и одновременно ограничено научным уровнем нашего понимания геологии, гидрогеологии и других наук о Земле. Современные компьютерные модели могут описать развитие геологических структур во времени, но все количественные предсказания базируются на вероятностных оценках. Расчетные данные будут иметь также неопределенный характер, и эта неопределенность сохраняется вне зависимости от того, сколько будет получено дополнительной информации. Объем наших знаний о природных геологических процессах постоянно растет, но одновременно растет и понимание об их изменчивости и непредсказуемости.

Для геологической системы нельзя получить корректные, адекватные параметры, как, например, для инженерных барьеров. «Само существование больших баз данных и сложных компьютерных моделей ошибочно предполагает, что можно спроектировать геологическое хранилище, как атомную станцию или ракетный авианосец, параметры которых могут быть рассчитаны с учетом их непродолжительного срока службы. Такая концепция точной предсказуемости будет продолжать приводить к срывам и неудачам. Единственно научно корректной задачей геологического моделирования является изучение того, как на протяжении требуемого времени обеспечить долгосрочную изоляцию радиоактивных отходов. Такая постановка вопроса глубоко отличается от количественного предсказания долгосрочного поведения хранилища» [166].

Наука на современном уровне не может однозначно «доказать» (в абсолютном смысле этого слова), что хранилище будет «безопасным» в соответствии со стандартами Агентства по защите окружающей среды и правилами Комиссии по ядерному регулированию. Позднее, в 2001 г. эта же позиция относительно неопределенности доказательства долгосрочной безопасности («proof of safety») была

подтверждена в исследованиях по разделению понятий «удаление» и «размещение» радиоактивных отходов [199]. В этой же публикации затронута еще одна проблема, связанная с подземной изоляцией долгоживущих радионуклидов и сроках проведения мониторинга в районе размещения ПЗРО. Для WIPP продолжительность активного мониторинга предлагается ограничить сроком в 100 лет [187]. Далее по времени следует период наблюдений «без опоры на активное управление» (“without reliance on active management”). В отечественных публикациях существует определение «без опоры на контроль». Однако при всех вариантах долгосрочного наблюдения должна сохраняться информация о подземной изоляции долгоживущих радионуклидов. Информация документальная, электронная и, что крайне важно, физическая на месте размещения могильника.

Будущие поколения могут просто забыть о существовании в данном месте геологического захоронения долгоживущих радионуклидов. Вероятность этого, рассчитанная для времени ~ 10 тыс. лет, значительно больше любого другого события, связанного с «человеческим фактором» [198]. Компьютерное моделирование показало, что именно действия людей в будущем составляют основную часть неопределенности в вероятностных расчетах, проводимых для долгосрочного прогнозирования. Одновременно выявлено большое значение правовых и административных институтов будущего для сохранения условий безопасности подземных могильников. Очевидно, что запрет на любое несанкционированное внедрение в «историческое» или «археологическое» наследие ядерного века должно приниматься на государственном уровне в статусе закона.

В 1992 г. Конгресс США обязал Агентство по защите окружающей среды пересмотреть вероятностную концепцию безопасности ПЗРО и, в частности, ответить на вопрос: «Можно ли дать научно обоснованные оценки вероятности того, что за 10 тыс. лет природные и инженерные барьеры геологического хранилища ВАО будут нарушены в результате каких-либо действий людей?» [198].

Решение вопросов, связанных с созданием долговременной системы предупреждения, оказалось сложнее, чем это предполагалось ранее. Департамент энергии в 1983 г. собрал группу специалистов, в которую были включены лингвисты, археологи, материаловеды и даже авторы научной фантастики. Предлагались различные варианты «увекочивания» (“perpetuate”) площадок и горных отводов со скрытой опасностью. Например, разрабатывался проект специальных памятных знаков путем внедрения в горные породы над могильником особых металлических или керамических жетонов, которые будут обнаружены на пути бурового инструмента при случайном вскрытии горного отвода ПЗРО скважинами или подземными выработками.

Ранее памятные знаки были установлены в местах проведения подземных ядерных взрывов. Недалеко от площадки WIPP (~ 3 км) находятся устье шахты и скважины, сооруженные для первого подземного ядерного взрыва в каменной соли «Гном». В настоящее время шахта надежно изолирована, приустьевая площадка забетонирована. Рядом с зацементированной вертикальной скважиной, пробуренной в полость взрыва, установлен памятный знак (рис. 82). В нем от имени Комиссии по атомной энергии США, руководимой Гленном Сиборгом, сообщается, что здесь в 1961 году произведен первый подземный ядерный взрыв в каменной соли по мирной программе «Плаушер». Но это только «памятный знак», который не рассчитан на длительное существование.



Рис. 82. Памятный знак на месте проведения подземного взрыва «Гном» в каменной соли формации Саладо в 1961 году (авторские фотографии).

По мнению специалистов, наглядным примером длительного существования объектов, созданных человеком, являются различные мегалитические сооружения, сохраняющиеся в течение нескольких тысяч лет. В первую очередь это менгиры – мегалитические памятники в виде отдельно поставленных камней, образующих иногда параллельные ряды длиной в несколько километров. Кроме менгиров широко распространены кромлехи – сооружения эпохи неолита и главным образом бронзового века в виде круглых оград из громадных каменных столбов до 6-7 метров высотой. По-видимому, они имели религиозное и магическое значение (рис. 83). Всеобщей известностью пользуется мегалитическое сооружение в южной Англии вблизи г. Солсбери – Стоунхендж (Stonehenge), начало строительства которого относится к 3100-2100 гг. до н.э.



Рис. 83. Зорац Карер, также известен как Караундж – предположительно самая древняя каменная обсерватория в мире, расположена на юге Армении, в области Сюник, недалеко от города Сисиан, на горном плато высотой 1770 метров над уровнем моря. Возраст Караунджа составляет более 7500 лет. Площадь территории, которую занимает памятник, составляет более 7 гектаров. Источник: <http://www.megalithy.ru> (время обращения 19.07.2013).

Для сооружения менгиров и кромлехов использовались блоки наиболее прочных горных пород, например, гранитов. Вес таких блоков достигал 50 – 100 тонн.



Рис. 84. Предупреждающий знак для территории WIPP [200].

Для WIPP был выбран «мегалитический» вариант, по которому вокруг законсервированных шахт по периметру прямоугольного участка площадью ~ 6 км² установят 32 гранитных столба (granite pillars) длиной 7,6 м [200]. Расстояние между столбами ~ 300 м. Внутри будет огорожен аналогичными гранитными столбами участок меньших размеров (~ 0,4 км²), в центре которого размещается информационный блок. В нем предлагается дать краткую информацию о хранилище на английском, испанском, русском, французском, китайском и арабском языках. На всей территории устанавливаются предупреждающие знаки с пиктограммами (рис. 84). Предусматривается распространение и сохранение информации о WIPP в архивах и библиоте-

ках.

Создание WIPP решило чрезвычайно сложную радиэкологическую проблему очистки и реабилитации многочисленных промышленных площадок США. В хранилище будут размещены трансурановые отходы, содержащие в общей сложности около 7,9 тонн плутония [201]. Однако проблему можно будет считать полностью решенной при создании современными средствами технических и информационных барьеров, на длительные сроки препятствующих несанкционированному техногенному внедрению в хранилище.

10. Перспективные участки строительства ПЗРО и особенности разработки соляных месторождений

На первых этапах выбора перспективных районов для последующего строительства ПЗРО проводится анализ имеющихся геологических исследований в определенной последовательности увеличения его масштабности и детализировки. Для соляных формаций необходима информация о наличии месторождений солей, данные о разработках этого полезного ископаемого и особенности проведения горных работ. Очевидно, что имеющийся опыт вскрытия соляных залежей и проходки подземных выработок может быть использован на этапах проектирования и строительства подземного хранилища.

Ниже приведен краткий обзор некоторых перспективных участков и эксплуатируемых месторождений солевого сырья за рубежом и в Российской Федерации.

Нидерланды.

В Нидерландах наличие солянокупольных структур определило наиболее вероятный вариант захоронения радиоактивных отходов в каменной соли [188]. Исследования и анализ различных гидрогеологических моделей начали проводиться в середине 70-х годов. Для оценки безопасности был выбран наиболее распро-

страненный на севере страны тип куполов с глубиной размещения кровли соляных пород 300 м. Соляной купол перекрыт породами кепрока (~ 50 м), глинами, суглинками и песками общей мощностью 250 м. Средние величины гидропроводимости для глин составляет $2 \cdot 10^{-9}$ м/с, для суглинков – 10^{-5} - $5 \cdot 10^{-5}$ м/с, для песков – $5 \cdot 10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Основные тоннели хранилища располагаются на глубине 600 м с охранными верхними целиками мощностью 300 м и боковыми целиками по 200 м. Канистры с остеклованными ВАО размещаются в вертикальных скважинах на трех горизонтах – 600, 750 и 900 м (рис. 85).

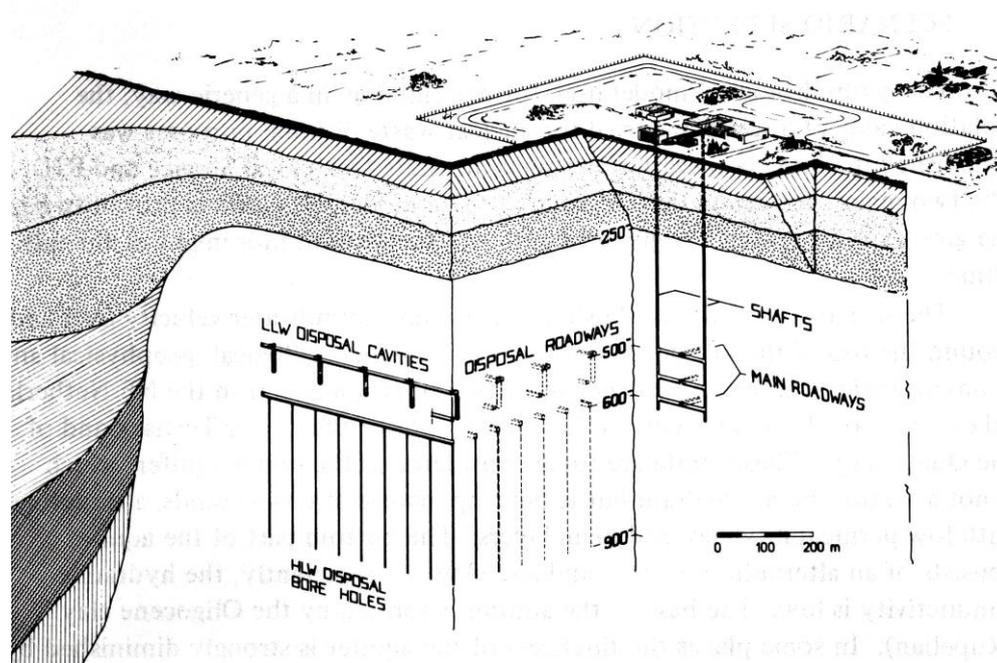


Рис. 85. Схема расположения хранилища радиоактивных отходов в солевом куполе [188].

Средняя скорость роста соляных куполов в районе г. Гронинген за третичный период составила не более 0,05 мм в год. При анализе учитывался пульсационный характер диапировых восходящих движений, скорость которых в период максимальной активности может достигать 2,5 мм в год. При этом может измениться гидрогеологический режим в перекрывающих купол породах.

Наиболее серьезным ландшафтно-климатическим изменением в будущем является морская трансгрессия с перекрытием поверхности хранилища мелководным морем.

Проведены лабораторные исследования влияния ионизирующего излучения на кристаллическую структуру галита. Разработан вариант заполнения пространства вокруг контейнеров хлоридом кальция для поглощения газов и уменьшения коррозии [202].

Модельные оценки показали возможность использования солянокупольных структур северных районов Нидерландов для строительства подземных хранилищ ВАО. Однако до настоящего времени решение о проведении дальнейших работ на соляных куполах не принято. Трудности в меньшей степени связаны с научно-технической стороной, а в основном носят организационный, финансовый и соци-

альный характер. Более приемлемо участие Нидерландов в исследованиях, проводимых за рубежом, например в Германии (каменная соль) или в Бельгии (глины). В настоящее время остеклованные высокоактивные и долгоживущие среднеактивные отходы размещены в наземном хранилище вблизи г. Борсселе, провинция Зеландия.

Республика Армения.

В Армении в среднем течении реки Раздан расположен Приереванский соленосный район площадью около 450 км² [35]. Соленосная толща неогенового возраста представлена переслаивающимися пластами каменной соли и глин. Мощность однородных пластов галита достигает 117 м, при этом в верхней части соленосной толщи глинистых прослоев меньше, чем в более глубоких частях. В пределах соленосного района выделяют несколько месторождений каменной соли – Аванское, Еларское, Егвардское и др. Соляные месторождения залегают в ядрах антиклинальных складок. Глубина кровли соляных пластов колеблется от 171 до 331 м. В кровле соленосной толщи залегают гипсовые глины и базальты общей мощностью 145-250 м.

В 1962 г. создано Абовянское подземное хранилище газа в каменной соли, объемом более 100 млн. м³. После Спитакского землетрясения с магнитудой 9,8 (1988 г.) хранилище полностью сохранило свои функции.

В 1985 г. состоялось совещание в Академии наук Армянской ССР с участием председателя Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР А.М. Петросянца, специалистов Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института промышленной технологии (Москва) и Радиевого института им. В.Г.Хлопина. Армянским ученым были представлены доклады с научно-техническим обоснованием возможности захоронения радиоактивных отходов средней и малой активности Армянской АЭС в подземном могильнике, сооруженном методом размыва в каменной соли. Отмечался опыт создания аналогичных сооружений для хранения газа и положительный опыт их эксплуатации. Исследования, проведенные в Радиевом институте, показали высокие сорбционные свойства присутствующих в солях глин, что создавало природную «композицию», объединяющую изоляционно-сорбционные свойства двух типов пород. После длительных дискуссий предложение о создании могильника в каменной соли было отвергнуто армянскими учеными.

Позднее в конце 90-х годов для предварительного выбора потенциальных площадок для строительства ПЗРО было проведено районирование территории по сейсмо-тектоническим критериям [203]. Для Республики Армения этот фактор является изначально определяющим, поскольку её территория находится в сейсмически-активной зоне. Выделено 12 потенциальных площадок в различных геологических формациях – вулканогенных, вулканогенно-осадочных, глинисто-карбонатных породах, гранитоидах и пр. Каменная соль в качестве среды для подземной изоляции РАО не рассматривалась.

В настоящее время радиоактивные отходы размещены на территории станции. С целью уменьшения рисков Министерство энергетики и природных ресурсов Армении в 2011 г. предлагало использовать Джаджурскую заброшенную угольную шахту (область Ширак на севере страны) [204].

Республика Беларусь.

После аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивному загрязнению подверглась значительная часть юго-восточной территории Республики Беларусь с общим количеством радиоактивных выпадений $\sim 1,26 \cdot 10^{18}$ Бк [205]. Площадь загрязненных территорий составляет 136500 км², из которых на 2200 км² среднее количество ¹³⁷Cs превышает 1480 кБк/м², на площади ~ 4200 км² загрязнение по ¹³⁷Cs варьирует от 555 до 1480 кБк/м² и на площади ~ 10200 км² – в интервале 185-555 кБк/м².

В процессе ликвидации последствий аварии и работ по дезактивации образовалось около 20000 т низкоактивных радиоактивных отходов, значительная часть которых была размещена в приповерхностных хранилищах Гомельской области (табл.60).

Таблица 60. Общая характеристика продуктов дезактивации в приповерхностных хранилищах Гомельской области [205]

Тип хранилища	Кол-во хранилищ	Объем РАО, 10 ³ м ³	Средняя удельная активность			Общая активность, Бк		
			¹³⁷ Cs, кБк/кг	⁹⁰ Sr, Бк/кг	^{239,240} Pu, Бк/кг	¹³⁷ Cs, $\times 10^{12}$	⁹⁰ Sr, $\times 10^{11}$	^{239,240} Pu, $\times 10^9$
Оборудованные	7	81	1,3-8,9	30-100	0,2-2,5	0,8	0,1	0,1
Необорудованные	74	300	0,1-33	40-900	0,2-20	1,9	1,4	3,4

В юго-восточной части республики Беларусь до настоящего времени остаются территория, загрязненная в результате аварии на Чернобыльской АЭС, и значительное количество временных приповерхностных хранилищ низкоактивных РАО. Наличие такой территории обосновывало вариант создания подземных хранилищ в районах с уже имеющимся радиоактивным загрязнением.

На юго-востоке Беларуси развиты глинистые отложения нижнего триаса. Для создания хранилища наиболее перспективна верхнемозырская подсвета, сложенная глинами и мергелями с тонкими прослоями алевролита и песчаника [206]. Мощность верхнемозырской подсветы варьирует от 10 до 131 м, достигая 171 м в скважине Домановичи 1 Р (Калинковичский район Гомельской области). Она служит водоупорной кровлей над водоносным горизонтом корневских отложений нижнего триаса. К отрицательным факторам верхнемозырской подсветы специалисты относят наличие прослоев обводненных песчаников и слабые прочностные свойства глинисто-терригенных образований, что потребует осушения и крепления горных выработок в процессе проведения горных работ и последующей эксплуатации ПЗРО.

Активизация работ по поиску площадок для подземной изоляции РАО на территории Беларуси связана со строительством АЭС. В Государственную программу «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009-2010 годы и на период до 2020 года» включена тема: «Разработка предложений по использованию геологической среды для решения проблемы обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом». Департамент по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор) Министерства по чрезвычайным ситуациям Беларуси считает, что при строительстве АЭС необ-

ходимо предусмотреть комплекс установок, технологических систем и хранилищ РАО, позволяющих минимизировать такие отходы и привести в состояние, пригодное для долговременного хранения или захоронения [207].

Чрезвычайно важным для формирования профессиональных знаний сотрудников является проект «Институциональное и техническое сотрудничество с Госатомнадзором для развития его возможностей, основанное на передаче европейских принципов безопасности и опыта». Необходимо расширить сотрудничество с международными организациями, европейскими экспертами, крупными национальными исследовательскими институтами для получения информации и обмена опытом в области ядерной и радиационной безопасности. За последние три года состоялись обучающие семинары, учебные курсы. Расширены программы в области изучения радиационной безопасности и радиоэкологии. К учебе привлечены сотрудники «Объединенного института энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси, участвующие в строительстве АЭС.

Выбор геологической формации, площадок строительства и обоснование безопасности ПЗРО должны проводиться в полном соответствии с международными критериями и нормативно-правовыми документами республики Беларусь. Современные условия развития ядерной энергетики требуют беспрецедентного, по сравнению с другими энерговырабатывающими отраслями, обеспечения мер безопасности и, что часто самое главное, социально-экономического принятия проектов обращения и удаления РАО. Устойчивое и безопасное развитие атомной энергетики возможно только при международном сотрудничестве и переходе на новые прогрессивные технологии. При этом принятие единых мировых стандартов для строящейся в Беларуси АЭС не снимут многие трансграничные претензии и спекуляции [207].

Анализ геологических формаций, проведенный специалистами «БЕЛГЕО», выделил в качестве приоритетного объекта для строительства ПЗРО соленосные отложения средне-верхнефоменской формации (верхний девон, 375-360 млн. лет) в западной части Припятского прогиба [206]. Припятский прогиб в структурном отношении представляет собой субширотно-вытянутый грабен, расположенный между Белорусским щитом на севере и Украинским на юге, от которых его отделяют Северо- и Южно-Припятские разломы [208].

Кристаллический фундамент архейско-протерозойского возраста в западной части прогиба залегает на глубине 1600-2400 м. Породы представлены гранитами, гранодиоритами и гнейсами.

Породы осадочного чехла залегают с несогласием на поверхности кристаллического фундамента. В состав чехла входят отложения верхнего протерозоя, палеозоя, мезозоя и кайнозоя.

В составе пород верхнего протерозоя преобладают песчаники, глины и тиллиты, мощность которых составляет 350-400 м.

В составе палеозойской группы выделяют отложения среднего и верхнего девона. Средний девон представлен глинисто-карбонатными породами наровского горизонта (мощность 55-96 м) и песчано-глинистыми породами старооскольского горизонта (мощность 129-170 м).

В верхнедевонское время формировались отложения франского и фаменского ярусов. Франский ярус представлен глинисто-карбонатными породами мощностью до 230 м. В верхней части яруса распространены сульфатно-карбонатные породы (гипсы, ангидриты, доломиты), относящиеся к нижней соленосной толще.

Соленосные отложения Припятского прогиба формировались в три этапа соленакпления: эйфельский, позднефранский, раннефаменский и средне-позднефаменский. Наиболее перспективными для строительства ПЗРО являются позднефранские и средне-позднефаменские соляные формации.

Соленосные отложения позднефранского времени развиты на площади 21 тыс. км². Их мощность изменяется от 95 м в северной части прогиба до 945 м на юго-востоке. Глубина залегания верхнефранской формации варьирует от 1040 до 4250 м, что значительно превышает принимаемую в настоящее время оптимальную глубину подземных хранилищ. Но эти глубины могут быть использованы для скважинного варианта подземной изоляции РАО.

Наиболее широким распространением на территории Припятского прогиба пользуются отложения средне-верхнефаменской соленосной формации. Её площадь составляет 23,2 тыс. км². Мощность формации изменяется от 65 до 3250 м, закономерно возрастающая на восток и резко уменьшаясь на крайнем востоке прогиба (рис. 86).

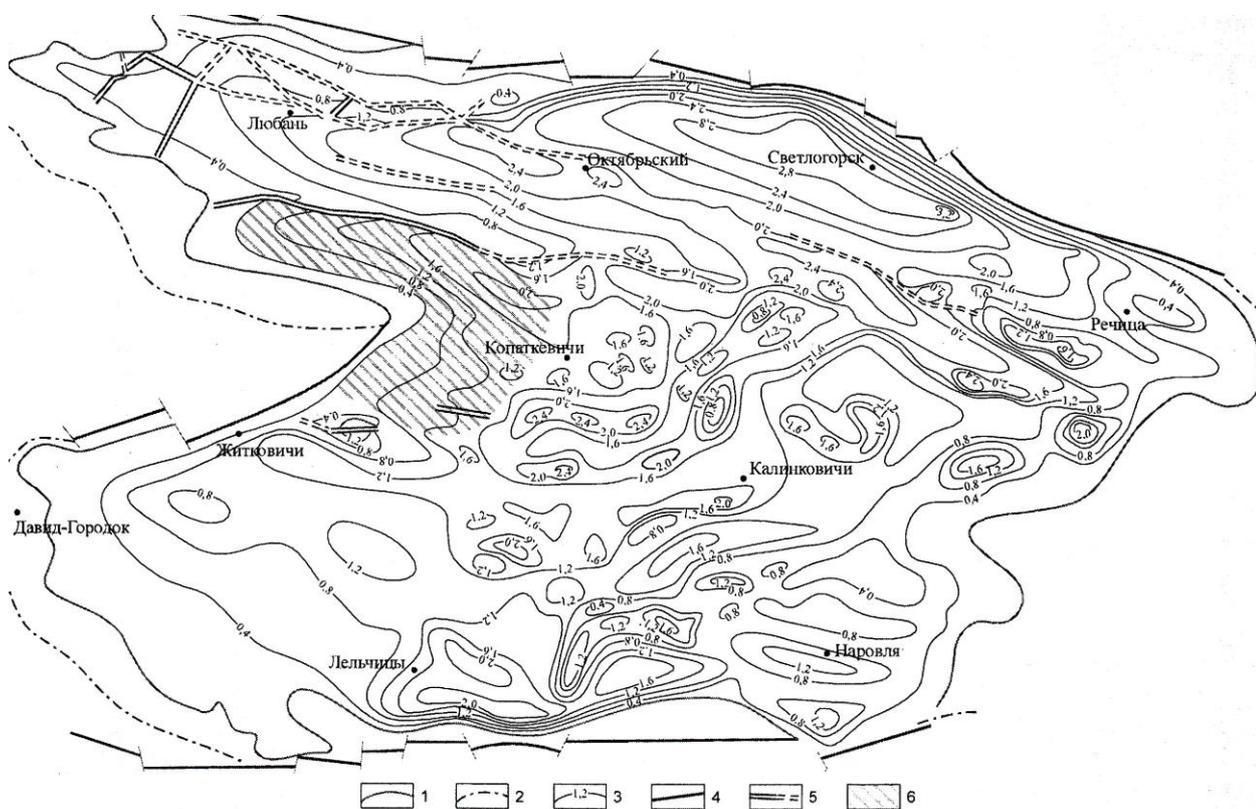


Рис. 86. Схематическая карта мощности верхнефаменской соленосной формации (составили Б.А. Протосевич, Э.А. Высоцкий, В.З. Кислик):

1 – границы распространения каменной соли; 2 – аналоги соленосной формации (без каменной соли); 3 – изопачиты формации, км; 4 – краевые разломы; 5 – прочие разрывные нарушения; 6 – перспективная территория для выявления альтернативных площадок, пригодных под заложение хранилищ высокоактивных РАО [206] .

Преобладающая мощность составляет 1300-1400 м. Соленосные отложения залегают на глубинах от 350 до 3000 м, погружаясь в направлении увеличения мощности. Минимальные глубины залегания кровли характерны для западной ча-

сти Припятского прогиба, а также для сводовых частей солянокупольных структур. Максимальные глубины наблюдаются в синклинальных структурах.

Содержание галита в соляных породах варьирует от 25 до 75 %, составляя в среднем 55 %. В калийных горизонтах присутствуют сильвиниты и карналлиты. Среди несоляных преобладают породы хемогенно-терригенного происхождения: карбонатные и слабокарбонатные глины, мергели глинистые, доломитовые и известковые, чистые доломиты и известняки, сульфатные породы.

Девонские породы перекрыты мезозойскими породами. Юрские отложения распространены спорадически и представлены чередованием слюдистых и песчаных глин с прослоями и линзами песков. Отложения меловой системы представлены в основном пясчистым мелом.

Кайнозойская группа представлена песчано-глинистыми отложениями палеогена, неогена и четвертичного возраста. Их общая мощность составляет обычно 50-80 м.

Основной тектонической особенностью Припятского прогиба является наличие и развитие обрамляющих его региональных разломов, образующих местами сложную структуру разрывных нарушений. Вблизи региональных разломов образуются разломно-блоковая структура палеозойских и мезозойских пород. В соляных формациях амплитуды разломов составляют 65-100 м. Общая ширина нарушенных зон с соляными брекчиями на контактах отдельных блоков пород достигает 30-35 м [209].

Структура поверхности средне-верхнефаменских соленосных отложений формировалась под влиянием трех факторов [206]:

- тектонических процессов на стадии седиментации;
- собственного соляного тектогенеза (галокинеза);
- подземного выщелачивания пород на постседиментационном этапе их преобразования.

Внутренняя структура формации в разрезах, не затронутых галокинезом, характеризуется практически горизонтальным залеганием переслаивающихся пачек каменной соли и несоляных пород. На участках развития соляной тектоники наблюдаются сложные деформированные структуры.

Соленосные толщи Припятского прогиба являются региональными водоупорами, присутствие которых обусловило наличие в Припятском артезианском бассейне двух гидрогеологических этажей. Доказательством высоких водоупорных свойств соленосных средне-верхнефаменских пород является сохранение в глинистых прослоях седиментационных поровых рассолов хлоридно-кальциевого состава с минерализацией более 400 г/л [206]. При отсутствии водообмена в постседиментационный период эти рассолы сохранялись в течение 360 млн. лет.

Различают надсолевой водоносный комплекс в мезозойско-кайнозойских отложениях и подсолевой – в породах девона и верхнего протерозоя. Надсолевой комплекс имеет мощность 100-120 м и относится к зоне активного водообмена. Воды его преимущественно пресные и используются для хозяйственного и питьевого водоснабжения. Подсолевой комплекс имеет мощность около 1000 м. Он приурочен к карбонатным породам франского и фаменского ярусов верхнего девона, к терригенным породам среднего девона и верхнего протерозоя. Водовмещающие карбонатные породы верхнего девона характеризуются низкой водообильностью и плохой проницаемостью.

В 1949 г. в северо-западной части Припятского соленосного бассейна открыто Старобинское месторождение калийных солей. Месторождение приурочено к фаменскому ярусу верхнего девона [209]. Его кровля залегает на глубинах 300-600 м. Мощность толщи в центре рудного поля достигает 550-880 м. Площади распространения калийных горизонтов составляют от 500 до 2500 км² при глубине залегания от 350 до 2000 м. Запасы К₂О оцениваются в 7,5 млрд. т.

Калийная залежь в соляной толще имеет субширотное простирание с падением пластов на северо-восток под углом до 6°. Калийные минералы (сильвинит, карналлит) в массиве соляных пород слагают обособленные горизонты (пласты) (рис.87). Мощность продуктивных пластов 0,5-8 м. Выделены 4 основных калийных горизонта.



Рис. 87. Пласты калиевых минералов (оранжевые) Старобинского месторождения. Высота забоя 3,1 м. <http://www.kali.by/photo/u2.jpg> (время обращения 27.07.2013).

В процессе разведки месторождения установлено, что в перекрывающих породах основными обводненными горизонтами являются мезозойские отложения и верхняя часть верхнедевонских до глубины 160 м. В процессе отработки калийных пластов может происходить увеличение фильтрационной способности надсолевой толщи, что приведет к поступлению в горные выработки водопритоков с верхних горизонтов. Существующие и созданные дополнительно гидроизолирующие условия обеспечивают защиту подземного шахтного комплекса от проникновения подземных вод.

На Старобинском месторождении проведены исследования изолирующих свойств глинистых пород мезозоя с ненарушенной структурой, отобранных с глубины 337 м при проходке шахтного ствола [210]. Изменение скорости фильтрации жидкости через глинистые породы обусловлено двумя конкурирующими процессами:

- растворением и выносом минерального вещества из трещин и пор;
- набуханием глинистых минералов с последующей кольматацией трещинно-порового пространства.

Первый процесс увеличивает, а второй – уменьшает скорость фильтрации жидкости. Превалирование одного из этих процессов зависит от минералогического состава, морфологии трещинно-порового пространства породы, литостатического

давления, градиента напора и вязкости жидкости (флюида), а также физико-химических процессов, развивающихся при взаимодействии породы с подземными растворами. При фильтрации водных растворов через глинистую породу, состоящую из малопроницаемых блоков, разделенных макро- и микротрещинами, происходит набухание пристеночных минералов и кольматация пространства трещин. Процесс залечивания трещин заканчивается после установления скорости фильтрации через трещину до уровня скорости фильтрации жидкости через ненарушенную массивную глинистую породу. По результатам лабораторных экспериментов, проводимых в условиях вертикального давления и обжата глин хлорит – гидрослюдистого состава, скорость фильтрации воды в образце с созданной искусственно трещиной первоначально составляла 10^{-3} см/с. Через пять суток эта величина уменьшалась до 10^{-5} см/с. В массивных образцах глин начальная скорость фильтрации воды составляла 10^{-5} см/с, а через пять суток уменьшалась на порядок. Авторы исследований отмечают существенную роль процессов залечивания разрывных нарушений и микротрещин в глинистых породах для изоляции соляных массивов от подземных вод.

При ведении горных работ в подземных выработках Старобинского месторождения отмечено большое количество трещин тектонического происхождения, секущих калийные горизонты. Трещины, как правило, залеченные, в основном вертикальные, без смещений. Их простирание согласуется с ориентировкой региональных разломов, обрамляющих месторождение.

Газ в горных породах, слагающих калийные горизонты, находится в микровключениях и в трещинах пород. В его составе преобладают азот и инертные газы, доля горючих газов невелика. Скопления свободных газов приурочены в основном к глинистым прослойкам, но иногда вместилищем газов являются макротрещины и небольшие пустоты.

Газодинамические явления при отработке шахтного поля приурочены к Третьему калийному горизонту. Выделение газа происходит при бурении скважин и шпуров в кровлю горных выработок. Наибольшее количество газовыделений приурочено к глинисто-карналлитовой пачке. Выбросы соли и газа происходят при проходке горных выработок и связаны в большинстве случаев с разрывными и складчатыми геологическими нарушениями в залегании калийных горизонтов. Основными геологическими структурами, опасными по внезапным выбросам, являются мульды и тектонические трещины.

Месторождение вскрыто четырьмя вертикальными стволами, расположенными в центре шахтного поля. При этом три ствола доходят до нижнего калиевого горизонта (600-683,5 м), один – до второго калиевого горизонта (503 м). Продуктивные горизонты разрабатываются проходческими комбайнами (ПК-8 и др.).

В связи с освоением Старобинского месторождения в 130 км к югу от г. Минска в 1958 г. построен крупный промышленный центр по выпуску калийных удобрений г. Солигорск. Население города составляет 101,3 тыс. человек (2004 г.). Солигорск – крупный центр горно-химической промышленности Беларуси, в котором функционируют пять калийных комбинатов. Основным производителем продукции является ПО «Беларуськалий».

В шахтах первого рудоуправления на глубине 420 м оборудована спелеолечебница, в которой используются природные факторы подземного пространства, расположенного в массиве каменной соли с калийсодержащими пластами (рис. 88).



Рис. 88. Спелеолечебница Солигорского территориально-медицинского объединения в шахтах Первого рудоуправления, <http://turegion.ru/respublikanskaya-bolnica-speleolecheniya/html> (время обращения 30.07.2013).

По мнению специалистов «БЕЛГЕО» для выбора перспективных площадок в соляных отложениях Припятского прогиба необходимо провести большой объем поисково-разведочных работ, соответствующих общепринятым международным требованиям и нормативно-правовым документам Республики Беларусь [206]. На этом этапе исследований целесообразны международная кооперация, привлечение независимых экспертов, оптимизация критериев выбора площадок и разработка дополнительных критериев, учитывающих специфику конкретных районов и площадок. Требуется анализ различных аспектов создания и эксплуатации хранилища «WIPP».

В 2012 г. в Российской Федерации утверждена государственная программа «Развитие внешнеэкономической деятельности», в рамках которой Госкорпорация «Росатом» будет осуществлять сотрудничество с белорусскими учеными по оценкам и выбору геологических формаций для строительства ПЗРО.

Для Республики Беларусь положительным фактором является опыт исследовательских и горнопроходческих работ, накопленный в процессе разведки и эксплуатации Старобинского месторождения, который может быть использован при строительстве ПЗРО в каменной соли.

Специалисты «БЕЛГЕО» считают нецелесообразным использование под хранилища РАО отработанных шахт в соляных формациях [206]. В качестве возражений выдвигаются две основные причины:

- для добычи каменной и калийных солей сооружение и конфигурация подземных выработок существенным образом отличается от требований строительства хранилищ РАО;
- горнодобывающие предприятия являются, как правило, градообразующими, и размещение потенциально опасных объектов вызовет активное противодействие местного населения.

За последние 20 лет выяснилось, что основным препятствием реализации проектов по выбору площадок для строительства подземных хранилищ РАО является не научно-технический фактор, а неприятие населением любых вариантов размещения радиоактивных отходов в районах его проживания [168]. Доказатель-

ства безопасности подземной изоляции должны быть не только научно обоснованными, но и доступными для восприятия неспециалистами. При этом существенное значение приобретает социально-психологический фактор. Например, при создании WIPP использовался аналоговый метод убеждения: «Каменная соль защищала себя в течение 270 млн. лет, следовательно, будут защищены и помещенные в неё отходы» [187]. Можно провести на перспективном участке изотопно-геохронологические исследования, чтобы определить уровень «закрытости» соляного массива, как это было сделано для Сеитовской структуры [111]. Однако все доказательства будут доступны для восприятия специалистов в области изотопной геохронологии, но малопонятны специалистам других научных направлений, и тем более неспециалистам.

Для солевых формаций Припятского прогиба в качестве одного из научно-обоснованных и общедоступных для понимания факторов целесообразна демонстрация обнаруженных при проведении горных работ на Старобинском месторождении панцирей ракоскорпионов (*Eurypterida*), живших в девонское время [211]. Прослой соли, в котором найдены ракоскорпионы, относится к фаменскому ярусу верхнего девона, с возрастом ~ 365 млн. лет. Длина ископаемого животного около 40 см (рис. 89). Это уже пятая находка эвриптерид за 30 лет. Вероятно, ракоскорпионы жили в реке, впадавший в солоноводный бассейн, и при попадании в соленую воду их тела консервировались – соль предохраняла от дальнейшего разложения. В дальнейшем сравнительно хрупкий панцирь полностью сохранился в изолирующей среде, которая не была затронута процессами деформации и перекристаллизации в течение последних 365 млн. лет.



Рис. 89. Панцирь ракоскорпиона (*Eurypterida*), найденный в калийных солях фаменского яруса верхнего девона (~ 365 млн. лет). <http://regiony.by/news/18220> (время обращения 30.07.2013).

Длительная «консервация» в каменной соли привнесенного объекта древней фауны – является предельно доступным примером для восприятия и понятным неспециалистам.

Республика Казахстан.

Крайнюю западную часть территории Республики Казахстан занимает Прикаспийская низменность, геологические особенности и история развития которой были представлены ранее в главе 5, посвященной площадке «Галит». Развитие солянокупольных структур предоставляет широкие возможности для создания крупного подземного комплекса изоляции радиоактивных отходов регионального или международного уровня.

Для кровлевых частей соляных куполов характерны месторождения боратов. В 1964 г. найдена бороносная глинисто-гипсовая порода купола Сатимолла в Актюбинской области, севернее известного ранее аналогичного месторождения купола Индер [212]. Породы, содержащие боровые минералы (ашарит, гидроборатит, колеманит и др.) образуют гипсовую шляпу (кепрок) крупного соляного штока. На месторождении Сатимолла обнаружен новый минерал стимулит – водный хлорсодержащий борат алюминия. Месторождение разрабатывается ТОО «Сатбор» с участием иностранных инвесторов. Добыча ведется шахтным методом на глубинах ~ 300 м. Планируется создание комплекса по переработке продукции месторождения на экспорт.

Основной поставщик каменной соли Казахстана – Жаксыклишское месторождение Аральского района, которое обеспечивает 80% всего требуемого количества соли [213]. Добыча и первичная обработка сырья ведется так же, как и на озере Баскунчак в Российской Федерации – специальными комбайнами.

В 2000 г. некоммерческой организацией «Социально-экономический Фонд «Единение России» была подготовлена аналитическая записка «Об организации научно-исследовательского полигона по изучению возможностей захоронения высокоактивных отходов в горном массиве Большой Азгир в Западном Казахстане» [214]. В подготовке аналитической записки принимали участие специалисты Радиёвского института им. В.Г.Хлопина, ВНИИНМ им. академика А.А.Бочвара (г. Москва), ВНИИПромтехнологии (г. Москва). Для геологической характеристики солянокупольной структуры Большой Азгир использована публикация [42]. Проведен экономический анализ захоронения РАО в солянокупольной структуре.

Предлагалось на территории республики Казахстан организовать опытно-практическую лабораторию с последующим опытным захоронением РАО в каменной соли. Поставленная задача могла быть решена совместными усилиями стран СНГ, при технологическом и научном участии Министерства по атомной энергии и Российской академии наук.

После трагической гибели президента фонда «Единение России» Е.Ю. Ефремова эти предложения не получили дальнейшего развития.

В 2001 г., основываясь на ранее проведенных исследованиях ВНИИЭФ и Радиёвского института им. В.Г.Хлопина солянокупольная структура Большой Азгир рассматривалась Комитетом по атомной энергетике Республики Казахстан в качестве площадки для захоронения РАО [215].

Против захоронения радиоактивных отходов на территории «ядерного полигона Азгир» выступило общественное антиядерное движение «Нарын». При этом отмечалось, что в качестве «отходного места» исключается конкретно Азгир, и при

выборе соответствующей местности, предложение «Казатомпрома» может быть реализовано. Порядок захоронения РАО в недрах, процедура получения в государственных органах разрешения на их захоронение изложены в Положении, утвержденном Правительством Казахстана [216].

В ходе дискуссии Азгир снова стал объектом внимания различных экологических сообществ и общественных движений. В печати появились хлесткие статьи с «обличительными» заголовками – «Спящий полигон Азгир продолжает отравлять жизнь азгирцев» [217]. Большинство населения республики Казахстан читают общедоступную популярную прессу, но только небольшое количество специалистов проявляет интерес к серьезным научным исследованиям, проведенным на территории Большого Азгира. К сожалению, растиражированные статьи в печати и Интернете содержат откровенную дезинформацию, написаны людьми чрезвычайно низкого научного уровня. Например, утверждается, что в Азгире геоэкологические условия на грани катастрофы по причине превышения в подземных водах ПДК по кадмию, литию, меди и марганца в 2-5 раз. Но какое отношение к этим элементам имеют проведенные подземные ядерные взрывы? Напоминание о том, что земля в Азгире заражена радиацией, сопровождается предельными по безграмотности инсинуациями. Например, что «цезий-137 распадается через 33 года, стронций через 90-100 лет, а период распада изотопа плутония-239 составляет от 242 до 6000 лет» [217]. Такие представители различных обществ спасения человечества в средствах массовой информации целенаправленно манипулируют общественным мнением, прививают и обостряют радиофобию [168].

Институты Национального ядерного центра Республики Казахстан постоянно контролируют ситуацию на территориях, где проводились ядерные испытания. Территории объекта «Галит» решением Акимата Атырауской области с 16.04.1996 г. переведены в категорию земель запаса и законсервированы сроком на 25 лет без использования в народно-хозяйственных целях. По результатам обследования по программе «Экология Западно-Казахстанской области на 2005-2007 гг. на бывших промплощадках объекта «Галит» наблюдаются локальные участки повышенного радиационного фона, которые, однако, не представляют существенной опасности [218].

В 2007 г. в Казахской академии питания (г. Алматы) состоялась защита диссертации Н.Б. Кожухметова «Гигиеническая оценка загрязнения почвы радионуклидами, тяжелыми металлами и его влияние на здоровье населения региона ядерного полигона Азгир» [219]. В автореферате автор диссертации подтвердил наличие «отдельных пятен загрязнений диаметром около 0,5-1,0 м» на территории промплощадок (в автореферате площадки называются «атомными») (табл. 61, рис. 90).

Приведенная из автореферата таблица вызывает недоумение, поскольку за естественный радиационный фон принимается значение ~ 30 мкР/ч, а в районе п.Азгир среднее значение мощности экспозиционной дозы, по измерениям 60-70 гг. составляла всего 16 мкР/ч [75]. В приведенной из автореферата таблице 78 очевидно излишнее количество значащих цифр при измерениях МЭД приборами, имеющими погрешность измерений 15%. Следует отметить, что обследование площадок не обнаружило прогнозируемый движением «Нарын» «выход наружу» из полостей взрывов «радиоактивной грязи» [215]. Без особых доказательств (по крайней мере, в автореферате Н.Б.Кожухметова) принимается, что загрязнение «региона полигона «Азгир» тяжелыми металлами (Cu, Cd, Co, Zn) обусловлено захо-

ронением военных отходов в образовавшихся после ядерных взрывов полостях, а также интенсивным многолетним использованием на этой территории всевозможного транспорта». При этом «транспортная» причина не подтверждается повышенными содержаниями свинца. Хорошо известно, что загрязнение окружающей среды тяжелыми, в том числе опасными для биосферы металлами является глобальной проблемой, и источники их поступления многообразны. Мониторинг здоровья населения в районах размещения радиационно опасных объектов должен сопровождаться всесторонним изучением факторов различной природы [220].

Таблица 61. Радиационный фон на территории технологических площадок полигона «Азгир» [219]

Технологическая площадка	МЭД, мкР/ч	Кратность превышения ЕРФ
А-1	58,3 ± 8,5	1,9
А-2	141,7 ± 20,5	4,7
А-3	163,6 ± 10,1	5,5
А-4	35,0 ± 3,5	1,2
А-5	121,7 ± 7,5	4,1
А-7	35,0 ± 8,1	1,2
А-10	140,7 ± 6,7	4,7

Примечание: МЭД – мощность экспозиционной дозы; ЕРФ – естественный радиационный фон

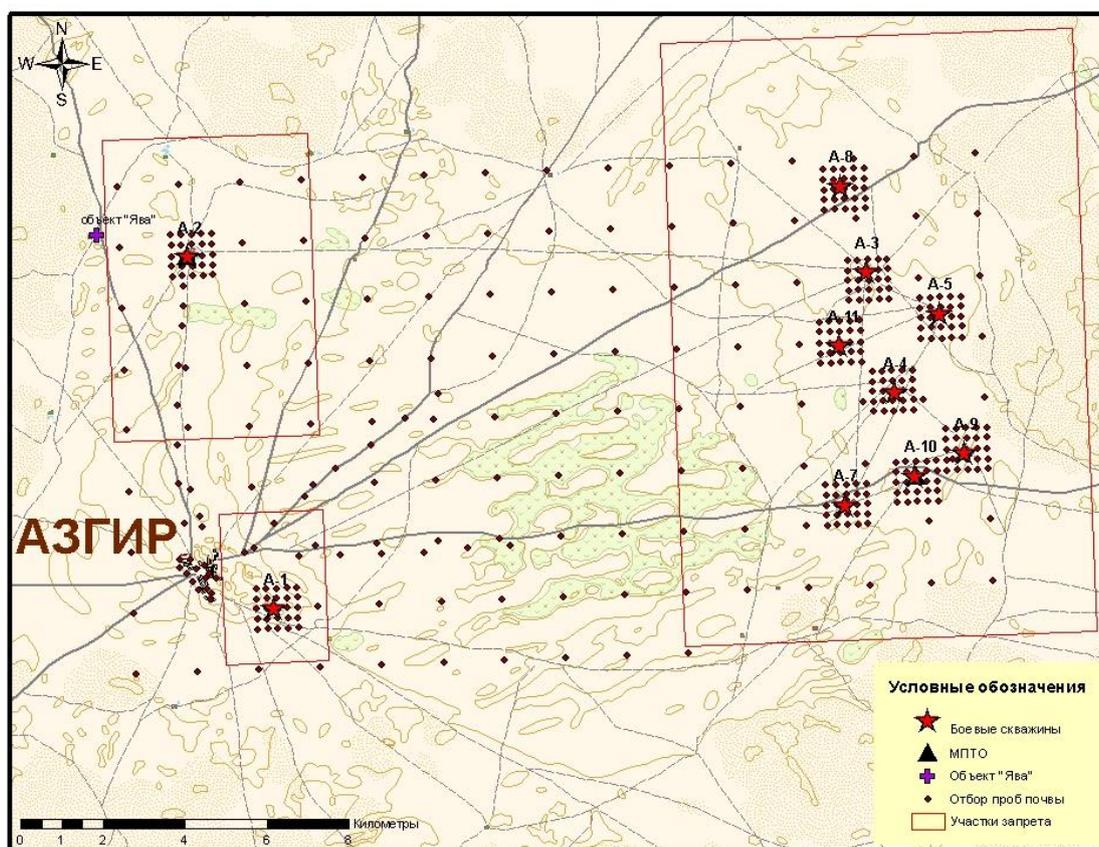


Рис. 90. Схема полигона «Азгир» с участками запрета буровых, геологоразведочных и других работ [221].

Следует отметить постоянный «антиядерный» характер текста автореферата, который начинается с присвоения научно-испытательной площадке «Галит» уровня «ядерного полигона Азгир». Автор необоснованно манипулирует терминами «атомная площадка», отходы «военно-технические», так называемые «мирные ядерные взрывы» и т.д. Удивляет пренебрежение диссертантом всеми проведенными ранее исследованиями, результаты которых известны по монографиям, статьям и докладам, в том числе на международных конференциях и совещаниях [42, 73, 75, 87, 93, 100, 101, 131].

Начиная с 1965 года на территории объекта «Галит» проводился регулярный контроль радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды [93]. Контролировались:

- содержание радионуклидов в почве (грунтах) и растительности санитарно-защитных зон промплощадок;
- содержание радионуклидов в почве, растительности, источниках водоснабжения в окружающих населенных пунктах.

Контроль осуществлялся как в ближайших кошарах (до 10-15 человек население) – Мехтей, Бале, Мекул, Даукен, Шукыр и др., – так и в крупных населенных пунктах вплоть до 70 км (г.Харабали) – Батырбек, Суондук, Балкудук, Азгир и жилпоселок Южной сейсмической экспедиции. Для проведения анализов использовались высокочувствительные методики, что позволяло надежно идентифицировать все радионуклиды, вплоть до космогенного ^7Be , в пробах выпадений. В большинстве проб основной вклад в «фоновую» радиоактивность вносил природный ^{40}K (до 90%). В 1976 году были зарегистрированы выпадения наземных ядерных взрывов, проведенных в Китае. В 1986 году в пробах выпадений обнаружены радионуклиды, связанные с аварией на Чернобыльской АЭС.

В 1995 г. в Национальный ядерный центр Республики Казахстан был представлен доклад ВНИИПромтехнологии (г. Москва) – «Анализ и обобщение материалов по геологии, гидрогеологии и проведенным подземным ядерным взрывам на солянокупольном месторождении Большой Азгир» [87]. Постановлением Правительства Республики Казахстан от 18.11.1998 г. № 1176 Минсельхозу, акиму Атырауской области и Национальному центру РК было предписано «определить границы вокруг территории бывшего объекта «Галит», на которой запрещается проведение геологоразведочных и буровых работ во избежание нарушения стабильности подземных полостей».

В 2013 г. были завершены комплексные радиоэкологические исследования Азгирского региона (п.п. Азгир и Балкудук) специалистами «Института радиационной безопасности и экологии» (ИРБиЭ) Национального ядерного центра Республики Казахстан. В представленном отчете [221] приведены основные характеристики системы миграции радионуклидов из центральных зон взрывов и геохимические барьеры структуры Большой Азгир, известные по публикациям сотрудников Радиевого института (см. главы 5.2, 5.3). Определены участки запрета буровых, геологоразведочных и других работ [рис.90]. По результатам радиоэкологических исследований ИРБиЭ Республики Казахстан установлено, что «обследованные объекты окружающей среды, несмотря на присутствие в непосредственной близости бывшего полигона «Азгир» по радиационным параметрам не оказывают значимого влияния на здоровье населения». Кроме того, «растительный покров исследуемой территории может считаться пригодным для ведения всех видов хозяй-

ственной деятельности без ограничения и не представляет никакой радиационной опасности ни в настоящее время, ни в будущем».

При этом каменная соль Большого Азгира вместе с урановыми карьерами Мангыстауской области и штольнями в гранитоидах Дегеленского массива (Семипалатинский полигон) остается в числе возможных территорий для размещения радиоактивных отходов в Республике Казахстан [222].

Российская Федерация.

В Российской Федерации существуют все необходимые условия использования соляных формаций для строительства ПЗРО.

В качестве обоснований такой возможности следует рассматривать следующие данные:

- 1) соляной промысел – древнейший на территории России, который получил широкое развитие в начале XX века открытием новых месторождений, строительством шахт и крупных комбинатов по переработке минерального сырья (Березники, Соль-Илецк);
- 2) широкое развитие соленосных формаций, присутствие в них ценного калийного сырья, связь соляных структур с месторождениями нефти и газа привлекли повышенное внимание к фундаментальным и практическим исследованиям, итоги которых широко представлены публикациями, материалами Всесоюзных солевых совещаний (1976, 1979, 1991 гг.) и т.п.;
- 3) в 1976 г. Государственному комитету Совета Министров СССР по науке и технике представлен доклад, в котором были охарактеризованы соленосные формации, перспективные для подземного захоронения твердых промышленных отходов [29];
- 4) в 1982 г. по результатам исследований ВНИИПромгаза (г. Москва) разработаны критерии пригодности геологической среды и составлен перечень месторождений каменной соли перспективных для сооружения подземных резервуаров методом размыва [35].
- 5) комплексные исследования каменной соли как среды для подземной изоляции радионуклидов проводились в рамках Государственной программы «Ядерные взрывы для народного хозяйства» в 1966-1984 гг. [24, 42, 52, 87, 100, 113, 142];
- 6) в 1990-1991 гг. определены технические условия отдельных операций и осуществлено захоронение радиоактивного грунта и загрязненных металлоизделий в полостях подземных взрывов, проведенных на соляном куполе Восточный Азгир [87, 93].

В Российской Федерации разрабатываются несколько основных месторождений минеральных солей [223]:

- Баскунчакское месторождение – добыча соли-самосадки из озера Баскунчак ОАО «Бассоль» (Астрахань);
- Илецкое месторождение в Оренбургской области – добыча в шахтах ОАО «Илецксоль»;
- Верхнекамское месторождение калийных солей в Пермском крае, ОАО «Уралкалий» (Березники), ОАО «Сильвинит» (Соликамск).

На всех перечисленных месторождениях разрабатывают соли кунгурского яруса нижней перми (270-275 млн. лет). В числе перспективных для разработки существуют и более древние соляные формации – нижнекембрийские (520-530 млн. лет). К усольской, бельской и ангарским свитам нижнего кембрия приурочено Не-

пское месторождение калийных солей [224]. Месторождение открыто в 1976 году на юге Сибирской платформы в Непско-Тунгусском междуречье. Продуктивная толща мощностью около 200 м сложена каменными и калийными солями, ангидридовыми и ангидрито-карбонатными породами. Пласты калийных солей располагаются на глубине 700-900 м. По минералогическому составу выделяются три типа разрезов: карналлитовый, смешанный сильвино-карналлитовый и сильвинитовый. Соляные пласты в пределах месторождения дислоцированы очень слабо и залегают почти горизонтально.

Пример Непского месторождения доказывает геологотектоническую сохранность соляной формации с легкорастворимыми калиевыми минералами в течение более 500 млн. лет. За этот значительный промежуток времени произошли сложные перемещения литосферных плит, сменились несколько последовательных этапов глобальных тектономагматических циклов.

Рассмотрение Непского месторождения затронуло одну из проблем выбора участков для строительства ПЗРО в каменной соли, касающейся исключения мест размещения полезных ископаемых [115]. Для каменной соли такое исключение не существует, поскольку распространенность и запасы этого сырья достаточно велики. Однако для месторождений калийных солей критерий исключения мест размещения полезных ископаемых соблюдается в полном объеме.

Прогнозные ресурсы калийных солей России составляют 12,65 млрд. т K_2O , что составляет ~ 17% мировых ресурсов. Около 40% мировых ресурсов сосредоточено в Канаде [225].

По извлекаемым запасам калийных солей Россия занимает второе место в мире после Канады. В 2007 г. в Российской Федерации добывалось 7,68 млн. т K_2O , при этом 5,9 млн. т шли на экспорт. Потенциальный объем внутреннего рынка оценивается в 2,3 млн. т. Однако в настоящее время потребление калийных удобрений в стране составляет около 300 тыс. т, что связано с «низким уровнем платежеспособного спроса со стороны российских сельхозпроизводителей» [225].

При постоянных изменениях условий купли и продажи, калийные соли останутся важнейшим и затребуемым сырьем, обеспечивающим высокий уровень производства сельскохозяйственной продукции во всех странах мира. По этой причине районы развития солевых формаций даже с потенциальной возможностью присутствия калийных солей должны быть исключены из рассмотрения при выборе площадок для строительства ПЗРО.

Первые сведения о солеварении в русских княжествах и Киевской Руси появились в письменных источниках не ранее XI-XII вв.[226]. Илецкая соль известна с начала XVI века по карте Российского государства, изданной по указу Ивана Грозного. Первоначально соль добывалась вручную открытым способом на поверхностных выходах соляных пород. В конце XVIII века началась добыча шахтным способом.

Исследование образцов илецкой соли произвел в XVIII веке М.В.Ломоносов. По его заключению «илецкая натуральная соль всех прочих солей тверже и, будучи истолчена, получает очень белый цвет и с воздуха в себя влажность отнюдь не принимает».

По описаниям того времени «илецкие соляные копи – богатейшие в целом свете месторождения каменной соли, прозрачной, чистой и крепкой как стекло: из нее можно выделять солонки, крестики и другие вещи; она в продаже идет за первый сорт. Масса соли лежит в виде огромной неправильной глыбы, что в гор-

ном деле называется соляным штоком. Шток этот покрыт слоем земли неравной толщины, от нескольких аршин (1 аршин – 0,7 м) до нескольких сажень (1 сажень – 2,1 м); во все стороны от него расстилается холмистая степь. На северной стороне возвышается гипсовая гора, оканчивающаяся на западе утесом. Она издали похожа на огромный насыпной курган и служит маяком для караванов, идущих из Хивы в Оренбург» [227]. Это одна из ранних характеристик Илецкого соляного штока с коренными выходами на поверхность каменной соли и сульфатных пород кепрока. Аналогичные формы рельефа наблюдаются на соляном озере Баскунчак, где породы кепрока образуют гору Большое Богдо в крыле солевого купола.

Илецкое месторождение относится к обширному Волго-Уральскому соленосному бассейну, в котором каменная соль образовалась в нижней Перми (кунгурский ярус). Приурочено к Илецкому соляному штоку (куполу), являющемуся частью Иртек-Илецкой складчатой структуры [228]. Верхняя часть штока до глубины 600-700 м имеет размеры 2,0×1,2 км. На глубине 1600 м по геофизическим данным его размеры 6×4 км. Шток прорывает пермские и неогеновые породы. При этом пермские отложения образуют его крутопадающие крылья с углами контактов 75-90°. Соляные формации кунгурского яруса подразделяются на три толщи (снизу вверх): сульфатную, галитовую, сульфатно-соленосную. Ядро штока сложено практически мономинеральной галитовой породой со средним содержанием NaCl 98,3%. По сложности месторождение относится ко 2-ой группе классификации запасов, однако оно обладает некоторыми чертами месторождений 1-01 группы в части выдержанности качества и мощности полезного ископаемого.

Внутри штока соляные пласты имеют почти вертикальное залегание с внутрiformационной складчатостью. Контактные зоны штока являются разрывными нарушениями, образовавшимися во время внедрения соляных масс в перекрывающие осадочные породы.

В 1881 году была сделана первая попытка заложения шахты. При разработках открытым способом атмосферные осадки приводили к порче сырья и выводу из строя карьера. Добыча шахтным способом началась на Соль-Илецком промысле в 1883 г. В настоящее время илецкая соль добывается на Руднике № 2 на глубине 277 метров. Его годовая мощность составляет 1,2 млн. т. Для разработки каменной соли используются горнопроходческие комбайны, которые послойно вскрывают подземные камеры. Отработанные камеры представляют собой крупные горные выемки с шириной и высотой 30 м и длиной 50 м. На стенках камер комбайн оставляет своими фрезами характерный «технический рисунок» (рис. 91). Ландшафт Илецкого месторождения имеет сложную карстово-антропогенную морфоструктуру [228]. За 250 лет добычи соли произошло изменение рельефа, сопровождающееся развитием соляного карста и образованием обширных озерных впадин. На базе озер Соль-Илецка существует один из лучших курортов России [229].

Курортный комплекс включает семь озер, в их числе: минеральные озера, имеющие высококонцентрированную соленую воду – рапу: Развал, Новое; грязе-рапные, содержащие рапу и лечебную грязь: Тузлучное, Дунино (Надежды), озеро Радости (прежнее название Голодные Воронки); минеральные, имеющие низкую концентрацию соли: Большое городское и Малое городское.



Рис. 91. Отработанная камера шахты № 2 Соль-Илецкого месторождения [227].



Рис. 92. Озеро Развал с концентрацией соли от 270 до 320 г/л [229].



Рис. 93. Соляные берега озера Развал [229].

На месте озера Развал находилась выступающая на поверхность кровлевая часть соляного штока (рис. 92, 93). В результате длительных разработок вся соль была скрыта, и на месте возвышенности образовался котлован глубиной 18 м. В 1906 г. котлован был заполнен водой из прорвавшейся в весенний па-

водок реки Песчанки. Диаметр озера около 300 м, концентрация соли, в зависимости от метеоусловий, колеблется от 270 до 320 г/л. По своему составу озеро похоже на Мертвое море в Израиле.

Гидрохимический и гидрологический режим озера имеет исключительный научный интерес [230]. Летом перемешивания воды в озере не происходит, и это приводит к накоплению на его дне мощной залежи гидрогалита $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Редким явлением является наличие на дне озера многолетней мерзлоты. Карстово-техногенный, гидрохимический феномен площадью 10 га имеет статус уникального геологического объекта (УГО) Соль-Илецкого района Оренбургской области.

Результаты исследований всего геолого-гидрогеологического комплекса (соляной шток, породы кепрока, соляные озера) представляют уникальные данные, определяющие особенности миграционных процессов в соляных формациях в зоне антропогенной модификации геосистем. По результатам природных наблюдений могут прогнозироваться различные сценарии, в том числе и аварийные ситуации, которые необходимо учитывать при оценках условий подземной изоляции радионуклидов в каменной соли.

Верхнекамское месторождение калийных солей находится в Пермском крае на левом берегу р. Камы. В границах месторождения расположены города Березники, Соликамск (рис. 94).

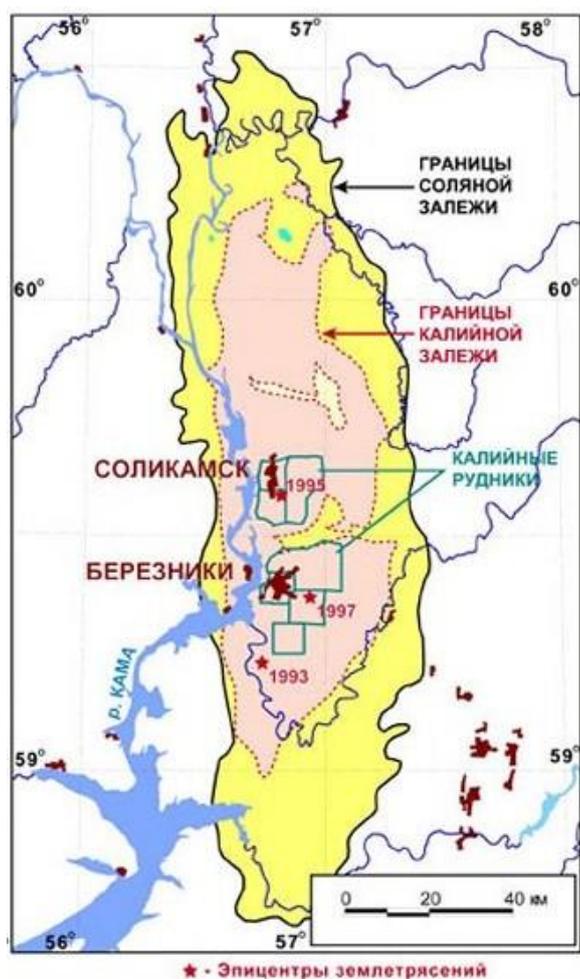


Рис. 94. Расположение Верхнекамского месторождения калийных солей. seismo/mi-perm.ru (время обращения 14.08.2013).

Первые солеварни на реке Усолке появились в середине XV века. В 1906-1907 гг. коренные пласты каменной соли были вскрыты скважинами на глубине около 80 м. В 1916 г. академик Н.С.Курнаков провел анализ «красной соли» из Соликамска, и обнаружил в ней содержания NaCl – 65,14%, KCl – 33,69% [231]. Средства на разведку месторождения были выделены в 1924 г., а в 1925 г. скважиной на территории бывшего Троицкого солеваренного завода на глубине 91,7 – 92,3 м вскрыт пласт калийных солей с содержанием KCl – 17,9 %.

Месторождение расположено в Печеро-Камском соленосном бассейне в Соликамской депрессии Предуралья краевого прогиба. Формирование соленосной формации происходило в нижней перми (кунгурский ярус), т.е. ~ 270-275

млн. лет назад. Соленосная толща разделяется на три зоны, различающиеся по условиям образования и минералогическому составу:

- зона подстилающих пород сложена пачками каменной соли мощностью 5-90 м с чередующимися слоями глинистых пород (3-6 м);
- зона калиево-магниевых солей представлена пластами калийных солей мощностью 0,8-7,5 м, переслаивающихся с пластами каменной соли и засоленных глин мощностью до 5,5 м; общая мощность зоны – 100-110 м;
- покровная зона сложена каменной солью с прослоями и включениями глинисто-ангидритовых пород; общая мощность зоны – 0,5-29 м.

Соляная линзообразная залежь вытянута с севера на юг на 200 км, шириной до 50 км, площадью 6,5 тыс. км². Залежь калийных солей имеет протяженность до 136 км, ширину до 40 км и площадь – 3,5 тыс. км².

Геологические запасы месторождения огромны и оцениваются по карналлитовой породе в 96,4 млрд т, по сильвинитам – 113,2 млрд т, по каменной соли – 4650 млрд т. Разрабатываются два крупных участка – Березниковский (на юге месторождения) и Соликамский (на севере). В настоящее время функционируют шесть рудников.

Суммарные запасы хлористых солей со средним содержанием К₂О в рудах 17,39% составляют по ОАО «Уралкалий» 931 млн. т, ОАО «Сильвинит» – 494 млн. т [225].

Глубина залегания кровли соленосной толщи колеблется от 100 м в южной части бассейна и до 770 м в районе г. Соликамска. Основными минералами залежи калийных солей являются галит, сильвин и карналлит, которые слагают практически мономинеральные породы. В настоящее время на месторождении известно 114 минеральных видов, которые связаны с четырьмя генетическими ассоциациями: собственно хемогенной (эвапоритовой) – 22%, эпигенетической – 37%, техногенной – 23% и кластогенной (обломочной) – 18% [232].

Хемогенная (эвапоритовая) ассоциация представлена карбонатами (кальцит, доломит, магнезит), сульфатами (гипс, ангидрит) и галоидами (галит, сильвин, карналлит), которые в масштабе всей залежи осаждались согласно гидрохимической последовательности: кальциевые минералы сменяются натриевыми, а затем калиевыми и магниевыми.

Эпигенетическая (наложенная) ассоциация связывается с процессами тектонических деформаций и складчатости в солях, отжатием рассолов и пресной кристаллизационной воды из глинистых прослоев и пластов с последующей миграцией в соляную залежь. При этом формируются син- и посттектонические жильные и пластообразные тела, прослой флюидальнокатаклазированных солей с текстурами течения и вращения, линзы перекристаллизованных галоидов, зоны брекчирования и замещения (галитизация), «внутренняя» складчатость (рис. 95). Красные сильвинитовые руды имеют слоистую текстуру, выраженную чередованием слоев галита (1-7 см), сильвина (1-10 см) и галопелитов. Сильвин представлен зернами сургучно-красного, темно-красного и розового цвета, изометричными или вытянутыми, размером 0,5-1,5 см. Галитовые прослой светло-серого и желтовато-серого цвета, иногда с вкраплениями зерен синего цвета.

В процессе эпигенеза происходит перекристаллизация ангидрита, галита, новообразование гипса, целестина, барита, гидрофиллита, различных карбонатов. В прослоях, обогащенных ангидритом, формируются сероводородные флюиды, которые мобилизуют рассеянные в солях железо, цинк, ртуть, мышьяк, серебро и, возможно, золото. При этом образуются пирит, пирротин, арсенопирит, сфалерит, киноварь, акантит, кварц. Наряду с тонкозернистыми агрегатами и вкрапленными

кристаллами образуются натечные дендриовидные агрегаты сульфидов железа, отражающие рост минералов в условиях сульфидно-коллоидного раствора.



Рис. 95. Слоисто-складчатое строение залежи калийных солей [232].

Кластогенная (обломочная) ассоциация представлена окатанными зернами песчаной и алевритовой размерности, образованными из пород магматических и метаморфических комплексов, которые поступали в Предуральский прогиб с разрушающегося Уральского складчатого сооружения в раннепермское время.

Техногенная ассоциация формируется в процессе и после вскрытия соляной залежи горными выработками. В горных выработках новообразование минералов происходит из аэрозольной фазы, конденсатных и закладочных рассолов. В основном они представлены галоидами, морфология которых зависит от существующих микрофациальных обстановок, а минералогия – от состава обрабатываемых пластов. Соляные отвалы развиваются как самоорганизующиеся геохимические системы. Они приобретают оптимальную форму и зональность, обеспечивающие устойчивость в поверхностных условиях. На их периферии формируются рассоло-сборники, в которых в зависимости от времени года и климатических условий кристаллизуются сезонные минералы: летом – галит, зимой – гидрогалит.

Агрессивность солей приводит к их взаимодействию с металлическими предметами и последующему возникновению многочисленных техногенных минеральных фаз.

В 2002 г. в кровле выработки карналлитового пласта шахты АО «Уралкалий» обнаружено два ствола углефицированного дерева. Длина стволов – 8,5 м, диаметр – 25-30 см. Возраст «законсервированных» деревьев около 250 млн. лет [233]. Это далеко не первая находка. Аналогичные образцы ископаемых деревьев были переданы для исследований и в музей «Уралкалий». Метаморфизм и дальнейшее сохранение органики в течение сотен миллионов лет происходили в практически бескислородной среде, при удалении летучих веществ и увеличении содержания углерода.

Внутренняя тектоника сильвинитной зоны относительно сложная: калийные пласты образуют складки с линейно-слоистой текстурой в синклиналях и сложно-складчатым строением в ядрах антиклиналей.

Район Верхнекамского месторождения характеризуется повышенной сейсмичностью (рис. 92), аномально высокими значениями скоростей современных

вертикальных движений земной поверхности, наличием активных на современном этапе ограничивающих глубинных разломов [234]. При этом в пределах месторождения наблюдается хорошая выдержанность пластов по литерали и всего разреза соляной тощи. Разрывы сплошности носят локальный характер, они малоамплитудны и, как правило, не выходят за пределы одного-двух пластов.

Новейшая тектоника и геодинамика определяют сложные горно-геологические условия ведения добычных работ на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. Случайное сочетание природных и техногенных факторов приводило к неоднократным аварийным ситуациям на рудниках месторождения.

Для предотвращения аварий на Верхнекамском месторождении были разработаны специальные комплексные мероприятия, требующие [235]:

- 1) полностью исключить при ведении очистных работ горнотехнические ситуации, приводящие к формированию зон повышенного горного давления;
- 2) проведение по всем шахтным полям действующих рудников ретроспективного анализа по выявлению в выработанных пространствах зон повышенного горного давления;
- 3) в выявленных опасных по геомеханической обстановке зонах, включая повышенную скорость оседания земной поверхности, оценить наличие угрожаемых природных зон по геологическим параметрам;
- 4) в случае наложения природных и техногенных опасных зон в пространстве – проведения комплекса геофизических исследований для уточнения строения водозащитной толщи и, при установлении опасной ситуации, разработка комплекса профилактических мероприятий по предотвращению негативных последствий, включая дозакладку выработанного пространства.

Несмотря на принятые меры, в 2007 г. на территории рудника в Березниках в районе фабрики по производству технической соли произошел провал грунта. Воронка размером 50 x 70 метров образовалась на месте прорыва грунтовых вод в подземные выработки. Правительство РФ было вынуждено возобновить работу комиссии по недопущению негативных последствий техногенной аварии на Верхнекамском калийно-магниево-месторождении в Березниках [236].

При анализе сложившейся ситуации было выдвинуто предположение о возможности миграции флюидов сквозь соляную толщу – возвращение к проблеме, которая не решена до нашего времени [237]. Привлечение флюидогеодинамики было необходимо для разработки методик прогнозирования горно-геологических условий освоения Верхнекамского месторождения – единственной сырьевой базы калийной промышленности России. Была выявлена природа очагов внезапных выбросов соли и газа, которые являются реликтами ранее существовавших флюидодинамических систем.

В г. Березники в 1989 г. была создана первая в мире наземная сильвинитовая лечебница, упростившая эксплуатацию подземных вариантов спелеолечения и расширившая количество обслуживаемых больных [238]. В спелеоклиматической камере стены и частично пол выложены блоками или плитами, выпиленными в шахте из сильвинитовой породы. В системе воздухоподготовки формируются требуемые параметры микроклимата. В настоящее время на территории СНГ и в дальнем зарубежье построено и функционирует свыше 500 сильвинитовых спелеоклиматических камер.

Широкое развитие солевых формаций на территории Российской Федерации (ранее – в Советском Союзе) определило разработки различных методов подземной изоляции РАО в каменной соли.

При захоронении отходов в специально созданных подземных выработках предельной температурой каменной соли вблизи контейнера считается температура ~ 250°C, и тепловая нагрузка в хранилище принимается ~ 100-400 кВт·га⁻¹. При таких условиях ежегодная площадь горных выработок для захоронения РАО, образующихся при переработки ядерного топлива АЭС общей мощностью 100 ГВт (эл), может составить от 40 до 75 га.

В качестве альтернативы рассмотрено захоронение в подземных полостях большого объема, соединенных с дневной поверхностью узким каналом технологической скважины [52]. Загрузку отходов предполагалось осуществлять через скважину диаметром 600-800 мм путем управляемого спуска пеналов с упаковками (бочками) [42]. Отходы загружаются «навалом», поэтому на длительную сохранность бочек и монолитной матрицы рассчитывать не приходится. Угол ожидаемого откоса навала приводит к величине заполнения свободного объема полости 0,6. Таким образом, в полость объемом 200 000 м³ может быть загружено 100 000 м³ или 220 000 т радиоактивных отходов.

В начале 80-х годов специалистами Радиевого института им. В.Г.Хлопина были предложены несколько вариантов изоляции РАО в полостях, созданных подземными ядерными взрывами, проведенными в солянокупольной структуре Большой Азгир [42]. Рассматривался «напряженный» вариант, при котором тепловая нагрузка приводит к плавлению каменной соли, и «мягкий» вариант при температурах вмещающего массива менее 100°C.

«Напряженный» вариант имеет ряд осложнений, связанных с газовыделением за счет термического разложения вмещающих пород, образованием расплава и его взаимодействием с каменной солью и отходами, а также фракционированию радионуклидов при остывании расплава. Эти процессы исследовались в лабораторных условиях с использованием реальных соляных пород и моделей фосфатного и боросиликатного стекла. Эксперименты показали реальную возможность полного растворения стекла с РАО в солевом расплаве.

При условии загрузки отходов с энерговыделением 8,5 МВт в полость в солях с сульфатными примесями за сутки выделяется около 250 м³ газов. Основным компонентом газовой смеси является СО₂. Поскольку захоронение отходов может продолжаться длительное время, то образование газовой фазы потребует ее стравливания и очистки (при наличии в отходах летучих радионуклидов). Остаются проблемы с неуправляемым режимом плавления каменной соли, что, безусловно, осложняет вариант максимальной концентрации РАО в массиве. Следует также учесть ограничение поступления в полости воды для исключения ее испарения, конденсации на более холодном своде, растворение кровлевой зоны и «всплытия» полости [73].

Необходимо отметить, что, несмотря на всю проблематичность «напряженного» варианта, спустя 18 лет после предложения по использованию полостей на площадке «Галит» Российским Агентством по патентам и товарным знакам был зарегистрирован способ захоронения радиоактивных материалов – RU 2152093 C1 [239]. Авторы изобретения предлагают разбурить скважину в мощной залежи каменной соли и закачать в нее растворитель вмещающей породы (галита). В скважину загружаются капсулы с тепловыделяющими РАО, под воздействием которых

происходит растворение дна каверны. После загрузки происходит разогрев капсул, и каверна отрывается от ствола скважины. Реализуется процесс самозахоронения. Способ, по мнению авторов, обеспечивает погружение материала (капсул) с высокой активностью на глубину до 5 км.

Очевидно, что с меньшими осложнениями реализуется «мягкий» вариант захоронения низко- и среднеактивных отходов в полостях в каменной соли, при котором повышение температуры стенок полости не превысит нескольких десятков градусов [42]. Основной проблемой «мягкого» варианта остается стабильность условий изоляции и надежность природных барьеров, т.е. все требования, которые должны быть изначально гарантированы при проведении подземных ядерных взрывов без последующего заполнения полостей РАО.

Большие мощности соляных залежей предоставляют возможности для захоронения РАО в глубоких вертикальных скважинах [52]. Проведены расчетные данные изменения температуры на стенках скважины при размещении в ней РАО с остаточным тепловыделением, равным $(5-2) \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-3}$ (предварительная выдержка 6 лет) и оценка температурного поля вокруг РАО с остаточным тепловыделением $2,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-3}$ к 10 и 100 годам после захоронения (рис. 96).

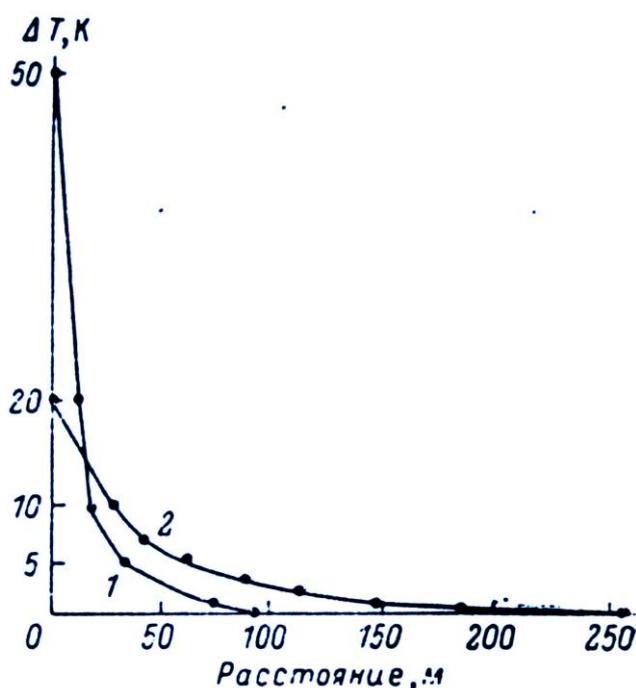


Рис. 96. Температурное поле вокруг глубокой скважины при захоронении ВАО с энерговыведением $2,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-3}$. 1 – через 10 лет, 2 – через 100 лет [52].

Если РАО захораниваются в системе скважин с шагом 100 м, то нагрузка на блок горного массива при рабочей глубине скважин 700 м и может составить не менее $\sim 400 \text{ кВт} \cdot \text{га}^{-1}$. Сеть таких скважин делает их практически теплонезависимыми при шаге не менее 50 м, и в этом случае на 1 га в «мягком» режиме может быть размещено ~ 6 скважин, в которых изолировано $1,2 \text{ тыс. м}^3$ отходов с суммарным энерговыведением $\sim 3 \text{ МВт}$.

Требуемая долгосрочная безопасность изоляции РАО в сверхглубоких скважинах определяется следующими положениями [240, 241]:

- Очень длинный путь возможного перемещения радионуклидов от места своей изоляции до биосферы, на котором процессы радиоактивного распада, разбавления, сорбции, новых фазообразований с нуклидами задерживают и препятствуют миграции;
- Практически полное отсутствие в местах захоронения водообмена в зонах застойных вод и рассолов;
- Для глубоких горизонтов характерна крайне низкая скорость перемещения флюидов, что связано с низкой пористостью пород (<1%), низкой проницаемостью (10^{-16} – 10^{-20} м²), а также присутствие вязких рассолов с большой плотностью;
- На больших глубинах геохимические условия препятствуют выходу радионуклидов из матриц и контейнеров с последующей миграцией, поскольку для этих глубин характерны восстановительные условия, при которых большинство техногенных радионуклидов будет иметь низкую растворимость. Высокая ионная сила рассолов будет служить дополнительным препятствием для образования и миграции коллоидных форм радионуклидов.

Вариант захоронения в глубоких скважинах или скважинах большого диаметра получил свое развитие в последующие годы, применительно не только для каменной соли, но и для других пород. В частности, в 2003 году специалисты ГУП МосНПО «Радон» разработали технологию захоронения низко- и среднеактивных отходов в вертикальных скважинах большого диаметра (~ 1,5 м) [242]. Состав буферного материала в сочетании с другими инженерными барьерами может полностью исключить миграцию радионуклидов за пределы хранилища.

Однородность крупных соляных массивов и высокие изолирующие свойства каменной соли представляют возможность создания геотехнологических хранилищ для малоиспользуемых продуктов ЯТЦ [243]. Предлагается хранить большие количества накопленного обедненного урана в полостях, созданных размывом в каменной соли. Фактически создается техногенное месторождение «до востребования». Для создания опытного хранилища предлагается по договоренности с ОАО «Газпром» использовать дополнительную емкость на Городищенской площадке (Приволжская моноклиналь между городами Волгоград и Камышин), на которой будут созданы методом размыва 16 подземных хранилищ газа [244]. Горно-технические и механические свойства каменной соли позволят в будущем сравнительно легко вскрыть искусственное месторождение и извлечь уран.

Радикальным решением проблемы РАО является создание специального подземного комплекса в крупном массиве каменной соли. Прототипом может быть американское хранилище “WIPP”. Очевидно, что сложность выбора площадок в первую очередь будет связана с заранее прогнозируемыми протестами местных властей и населения. Зарубежный опыт показывает, что уже на стадии альтернативного выбора необходима комплексная программа по анализу социально-экономических условий потенциального региона, тщательная разработка научно-популярной информации, определение условий финансово-экономического стимулирования района строительства ПЗРО и пр.

Анализ имеющейся информации показывает, что, несмотря на широкое развитие соленосных геологических формаций на территории Российской Федерации, выбор перспективных площадок, полностью соответствующих базовым геологическим критериям, затруднен. Например, уже упоминавшаяся Приволжская моноклиналь имеет высокую плотность заселения и перспективу

освоения и промышленного строительства на новых территориях. Необходимо также учитывать близость крупнейшей водной системы – реки Волги.

Восточные регионы развития соленосных отложений мало заселены, но удалены от основных источников РАО, и требуют создания дорогостоящей инфраструктуры.

Наиболее целесообразно для строительства ПЗРО использовать нижнепермские отложения каменной соли Предуральского краевого прогиба [12, 228] (рис. 97). В 80-е годы в качестве одного из вариантов рассматривался участок «Лемеза» (по р.Лемеза). Перспективная площадка расположена на территории Уральского Федерального округа в 60-и км восточнее г. Уфы в Иглинском районе Республики Башкортостан, на границе с Челябинской областью. Территориально это северо-восточное окончание Волго-Уральского соленосного бассейна.

В структурно-тектоническом отношении участок относится к северной части Бельской впадины Предуральского краевого прогиба, захватывая её западный борт и депрессионную наиболее погруженную часть. Мощность соленосных толщ на двух разведанных участках Северо- и Южно-Лемезинском составляет 300-500 м. Каменная соль кунгурского яруса нижней перми залегает на известняках артинского яруса (нижняя пермь) и перекрывается аргиллитами, алевролитами и песчаниками уфимского яруса верхней перми. Породы уфимского яруса перекрыты песчано-глинистыми осадками триасового и неоген-четвертичного возраста.

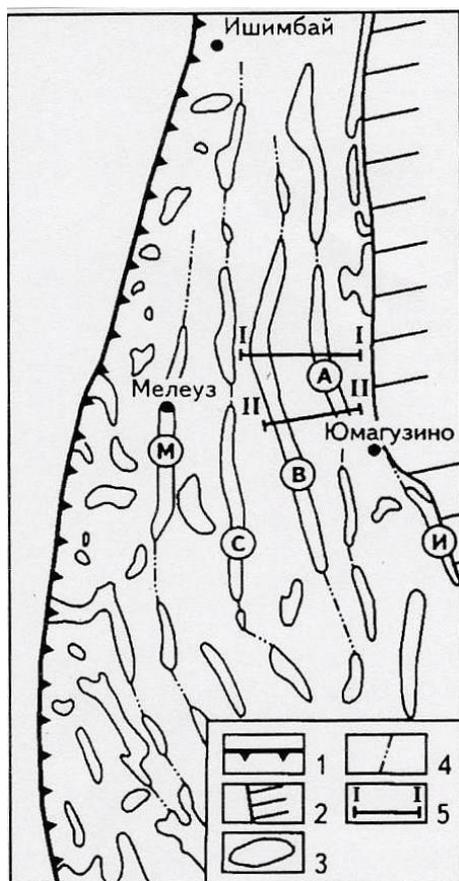


Рис. 97. Схема размещения галогенных структур кунгура Бельской впадины Предуральского прогиба [12].

Соляные валы:

- м– Мелеузовский,
- с – Смаковский,
- в – Воскресенский,
- а – Александровский,
- и – Иртюбякский.

1 – западная граница впадины; 2 – область отсутствия отложений кунгура; 3 – соляные поднятия; 4 – оси кунгурских валов; 5 – линии геологических разрезов.

Общая мощность пород, перекрывающих соленосную толщу достигает 400 м. Максимальная мощность солевой толщи приурочена к межрифтовым впадинам и депрессионной части Предуральского прогиба. Разрез соляной формации представлен переслаиванием каменной соли и пластов ангидрита, алевролита. На участках максимальной мощности преобладает однородная каменная соль.

На участке «Лемеза» в 90-е годы предполагалось продолжить разведочные работы для оценки возможности создания в кунгурских солях подземного хранили-

лица РАО, а в глинистых грунтах – приповерхностного ПЗРО. Такой комплекс изоляции радиоактивных отходов будет наиболее целесообразен для Центрального округа, имеющего высокую плотность населения и большую антропогенную нагрузку на природные геосистемы.

На территории Предуральского краевого прогиба Лемезинский участок не является единственным для постановки поисково-разведочных исследований на возможность строительства ПЗРО. Соляные формации широко развиты среди геологических структур Южного Урала в пределах Республики Башкортостан и Оренбургской области. Определенный интерес представляют кунгурские структуры Бельской впадины. Кровля сульфатно-галогенных пород южной части Бельской впадины (южнее г. Ишимбай) образует серию линейно вытянутых субмеридиональных валов, обнажающихся на поверхностном ландшафтном срезе [228]. Развитие соляной тектоники создало в пластичных толщах каменной соли диапировые поднятия различных форм и размера. Наблюдаются переходы от горизонтально лежащей серии соляных пластов до грабеновидных с вертикальными и веерообразно запрокинутыми крыльями.

Для всего региона Южного Урала при выборе перспективных участков соляных формаций в первую очередь необходимо учитывать их структурно-тектонические характеристики.

11. Проблемы захоронения радиоактивных отходов

Научно-практические знания, накопленные в процессе многовековой разработки месторождений каменной соли и строительства в соляных породах подземных сооружений различного целевого назначения, позволили выдвинуть солевые формации в качестве одной из перспективных геологических сред для подземной изоляции радиоактивных отходов. Дополнительная информация об изолирующих свойствах каменной соли и о миграции в соляных формациях техногенных радионуклидов была получена в результате исследований подземных ядерных взрывов, проведенных в Советском Союзе по Государственной программе «Ядерные взрывы для народного хозяйства». В настоящее время каменная соль является первой и пока единственной геологической средой, в которой созданы и эксплуатируются подземные хранилища радиоактивных отходов. При этом хранилище в США WIPP рассчитано на сохранение своих изолирующих свойств в течение сотен тысяч лет.

Несмотря на оптимистические оценки соляных формаций, в настоящее время сохраняется ряд нерешенных проблем, касающихся безопасности подземной изоляции радиоактивных отходов, включая отходы ядерно-взрывных технологий.

В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 11 июля 2011 г 190-ФЗ радиоактивные отходы, образовавшиеся в результате использования ядерных зарядов в мирных целях, отнесены к особым радиоактивным отходам (Статья 26). Обращение с ними осуществляется с учетом состояния пунктов размещения, пунктов консервации и потенциальной опасности размещенных в них РАО. Проведенный анализ показал, что особые отходы ядерно-взрывных технологий в настоящее время невозможно или экономически нецелесообразно извлекать на поверхность и изолировать от

среды обитания в специально созданных ПЗРО. Условия подземной изоляции техногенных радионуклидов после проведения подземных ядерных взрывов в каменной соли не дают оснований для принятия решений о полном извлечении этого типа особых отходов. Для увеличения безопасности подземной изоляции требуется перевод жидких радиоактивных рассолов в твердую фазу.

Выше были приведены данные, характеризующие новообразованные продукты подземных ядерных взрывов в каменной соли – радиоактивных отходов ядерно-взрывных технологий. При подземном ядерном взрыве одновременно образуются и захораниваются техногенные радионуклиды. Характерно многообразие форм выделения, фазового и радионуклидного состава особых отходов, размещенных в структурно-геохимических зонах. В качестве твердых отходов следует рассматривать:

- переплавленную каменную соль (1000 т на 1 кт мощности заряда) в донной части полости, содержащую ^{137}Cs и ^{90}Sr , в количествах $\sim 10^3$ Бк/г каждого;
- сконцентрированные в донной части полости или распределенные по всему объему переплавленной соли силикатно-железистые шлаки и новообразованные высокотемпературные минералы, содержащие остатки делящихся материалов (в шлаках взрыва А-I среднее содержание $^{239,240}\text{Pu}$ составило $\sim 5 \cdot 10^5$ Бк/, а их общее количество ~ 5 т);
- каменная соль ореольной зоны, в трещинах которой крайне неравномерно распределены ^{90}Sr и ^{137}Cs ; содержание последнего варьирует от 10^2 до 10^4 Бк/г.

Кроме того, в полостях взрывов, как правило, присутствуют насыщенные солевые растворы (минерализация 330 г/л, плотность $1,2$ г/см³, рН в пределах 6,6-7,5), содержащие на момент образования ^3H до 10^8 Бк/г, $^{90}\text{Sr} \sim 10^5$ Бк/г, $^{137}\text{Cs} \sim 10^6$ Бк/г.

Степень потенциальной опасности отдельных объектов проведения мирных ядерных взрывов будет зависеть от целого ряда факторов, которые впоследствии должны определить методы и форму изоляционно-ликвидационных мероприятий. В качестве примера рассмотрена Целевая программа ООО «Подземгазпром» для объекта «Магистраль» (одиночного взрыва мощностью 2,3 кт) в Оренбургской области и для объекта «Вега» (13 взрывов мощностью 8,5 кт) в Астраханской области. В последнем случае работы по изоляции особых отходов приходится проводить в сложных условиях (аварийная конвергенция полостей, выдавливание по технологическим скважинам радиоактивного рассола и пр.), для чего потребовались дополнительные исследования и новые технологии [156, 157].

Для отдельных взрывов необходимо учитывать наработку изотопов. На Восточном куполе Большого Азгира при взрыве А-III образовалось 2,5 кг ^{233}U ($T_{1/2} = 1,58 \cdot 10^5$ лет) и 0,5 кг ^{231}Pa ($T_{1/2} = 3,27 \cdot 10^4$ лет) [73].

При оценках отходов ядерно-взрывных технологий необходимо учитывать фактор времени. Средняя концентрация активности продуктов деления в расплавах ядерных взрывов оценивается в $\sim 3,7 \cdot 10^5$ Бк/г с уменьшением до $2,2 \cdot 10^4$ Бк/г через 10 лет после взрыва, что соответствует уровню низкоактивных отходов. Через 100 лет уровень активности уменьшится еще на порядок [73].

Во всех случаях после проведения подземных ядерных взрывов в каменной соли необходимо обосновать условия изоляции особых отходов, фактически оценить барьерные свойства геологических формаций на участке размещения взрывных полостей. Такие исследования проведены для всех соляных структур, в которых присутствуют особые отходы ядерно-взрывных технологий – для соляного купола Большой Азгир, соляных структур Оренбургского, Астраханского и Карача-

ганакского месторождений (главы 5-8). Радиоактивные отходы перечисленных объектов изолированы от внешней среды низкопроницаемыми соляными породами, перекрывающими их гидроизолирующими глиносодержащими осадками и гравитационно-устойчивой системой минерализованных подземных вод.

Как правило, основным каналом связи с поверхностью, а, следовательно, и потенциальным источником выхода миграционноспособной формы отходов – радиоактивных рассолов – являются технологические скважины.

11.1. Прогнозирование безопасности подземной изоляции РАО

Существующая в наше время барьерная система на участках проведения взрывов не является обоснованием безопасности подземной изоляции РАО в будущем, поскольку со временем ее свойства могут измениться. Среди отходов ядерно-взрывных технологий присутствуют долгоживущие изотопы, что требует разработки долгосрочного прогноза состояния и изменений геологических формаций в районе проведения взрывов. Разработка и научное обоснование прогнозирования условий подземной изоляции является важнейшей проблемой развития всего направления удаления радиоактивных отходов в геологические формации [132]. Ранее в главе 9 отдельные аспекты этой проблемы уже рассматривались.

Разработка прогноза разделяется на решение отдельных ключевых вопросов, которые по сходным признакам выделяются из общей проблемы прогностической экстраполяции. Выделение может быть пространственным (глобальный, региональный, локальный прогноз), по времени (прогнозные оценки на 300-500 лет, 1000, 100 000 и миллион лет). Широко используются палеореконструкции развития геологических структур, рельефа и климата; хроностратиграфические, палеогидрогеологические, палеосейсмологические и другие исследования.

11.1.1. Краткосрочное прогнозирование

Краткосрочный прогноз на будущее 300-500 лет выделяет условия безопасной изоляции основных компонентов РАО – ^{137}Cs и ^{90}Sr , с периодами полураспада 30,17 года и 29,1 года соответственно. Сохраняя прерогативу наук о Земле при разработке прогноза безопасности, для конкретного случая особых отходов ядерных взрывов в каменной соли целесообразно использовать результаты инженерно-геологического обоснования строительства полигонов хранения отходов в солянокупольных областях [245, 246].

Критерии выбора полигонов захоронения твердых и жидких бытовых отходов в значительной степени совпадают с критериями выбора площадок для ПЗРО. При этом необходимо учитывать, что большинство компонентов захораниваемых отходов (Hg, Tl, Cd, Pb, F и др.) являются стабильными элементами, существующими «вечно», и требуют долгосрочного прогноза безопасности своей изоляции. После закрытия и рекультивации полигонов токсичных отходов их геоэкологическая безопасность должна обеспечиваться практически бессрочно [246].

Полигоны подземного захоронения бытовых отходов являются объектами экологического риска, в особенности при их размещении в солянокупольных областях. Это связано с проявлением современных движений солянокупольных структур, способных нарушить герметичность коллекторов или привести к авариям скважин и последующему загрязнению водоносных горизонтов. В условиях Волгоградской и Астраханской областей, имеющих плоский рельеф и неглубокое залегание

ние грунтовых вод, подземное захоронение отходов не имеет альтернативы, поскольку поверхностные отстойники требуют громадных площадей, создающих обширные зоны загрязнения. Для обеспечения безопасности подземного захоронения в Прикаспийской низменности требуются детальные исследования влияния соляной тектоники на различные природно-технические системы, изучение свойств пластов коллекторов и ограничивающих их природных барьеров.

В результате проведенных комплексных исследований западной части Прикаспийской низменности (районы Волгоградской и Астраханской городских агломераций) были определены [246]:

- особенности инженерно-геологических условий прикаспийского солянокупольного бассейна – наличие мощного осадочного чехла четвертичных морских и континентальных отложений в низменных аккумулятивных равнинах с плоским рельефом и неглубоким залеганием грунтовых вод;
- современные знакопеременные тектонические движения соляных куполов, формирование над ними зон растягивающих напряжений и, как следствие, грабенов оседания, разломов, зон повышенной проницаемости;
- пространственные закономерности распространения первого от поверхности водоупора – пласта морских хвалынских глин, отвечающих свойствам геологического барьера и среды захоронения отходов в местах своего максимального развития в межкупольных мульдах;
- принципиальные подходы к размещению современных полигонов захоронения твердых бытовых отходов в солянокупольных областях, в межкупольных мульдах и депрессиях на основе составленной карты перспективных территорий.

Анализ имеющихся данных относительно соляной тектоники показал, что скорость роста куполов вдоль железной дороги Сызрань – Астрахань за период с 1928 по 1958 гг. составила 0,9-1,3 мм/год. Более поздние исследования показали, что эти скорости нестационарны по величине и направлению. По результатам наблюдений 1987-1990 гг. на геодезическом полигоне Светлоярского купола (Волгоградская область) средняя скорость его роста составляет 2 мм/год. При этом была выявлена нестационарность движений – в 1987 г. купол поднимался со скоростью до 6-12 мм/год, а в 1988-1989 гг. – опускался со скоростью 1,7-3,4 мм/год. В 1990 г. происходил новый подъем со скоростью 6-14 мм/год. Установлено, что движение над вершиной купола неодинаковы и зависят от внутренней складчатой структуры.

Нестационарность движений подтверждена исследованиями на Паромненском куполе (Волгоградская область), вершина которого в 1998-1999 гг. поднималась со скоростью 8,85 мм/год, а склоны купола опускались со скоростью около 4,5 мм/год. Более поздние измерения выявили инверсию, т.е. вершина купола испытывала погружение со скоростью 14,8 мм/год, а на южном склоне отмечался подъем со скоростью 6,4 мм/год. Наличие инверсии объясняет существующие расхождения в оценках усредненных значений скорости движений соляных куполов. Существующие данные свидетельствуют, что скорость современных движений на порядок выше новейших (0,02-0,2 мм/год) и на два порядка выше скорости движений за геологическое время – 0,005-0,02 мм/год.

Во время поднятий над куполами в перекрывающих породах развиваются зоны растяжения, а в межкупольных депрессиях – зоны сжатия. Следствием этих процессов может быть развитие надкупольной трещиноватости, увеличение проницаемости, усиление водо- и газообмена. Ослабленные зоны трещиноватости мо-

гут развиваться вдоль крутых стенок куполов, в зонах максимальных тектонических напряжений.

Однако, несмотря на сложный режим движения купола, гидрогеохимический мониторинг эксплуатирующегося полигона жидких отходов завода «Волжский Оргсинтез», расположенного на восточном склоне Паромненского купола, не выявил каких-либо загрязнений в наблюдательных и контрольных скважинах.

Для размещения полигонов хранения твердых бытовых и промышленных отходов наиболее перспективны межкупольные и внутрикупольные депрессии, заполненные отложениями хвалыньских глин. По минералогическому составу в глинах преобладают гидрослюды и монтмориллонит. Невыветрелые глины практически водонепроницаемы и имеют высокую емкость поглощения. Ориентировочное время фильтрации дренажных вод через 15-метровый слой хвалыньских глин составит около 900 лет.

Установленные закономерности развития крупных геологических структур позволяют прогнозировать длительное сохранение геолого-тектонического режима на территории Прикаспийской низменности. В ближайшем геологическом будущем будут продолжаться разнонаправленные, малоамплитудные движения соляных куполов Западного Прикаспия. Условия развития рельефа солянокупольных областей позволяет прогнозировать присутствие в геологическом разрезе глинистых водоупоров с высокими сорбционными свойствами.

На основе проведенной инженерно-геологической типизации рассматриваемой территории составлена карта и выделены перспективные участки для размещения современных полигонов захоронения твердых бытовых и промышленных отходов на территории Западного Прикаспия [246].

Для разработки краткосрочно прогноза (300-500 лет) должны быть использованы существующие общие требования и государственные стандарты. Примером является Госстандарт России – «Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов» [247]. Стандарт определяет требования и содержание работ по обязательному компоненту прогноза – мониторингу геологической среды. По результатам мониторинга могут быть приняты превентивные меры по снижению негативных явлений, возникших в результате воздействия каких-либо неучтенных прогнозом факторов. В частности, стандартом предусматривается контроль и составление базы данных геодинамического режима наблюдаемых территорий, вертикальных и горизонтальных движений земной коры, компоненты полей напряжений и деформаций, физические свойства пород и пр.

Существующие нормативно-законодательные документы и современные технические возможности позволяют обеспечить безопасность объектов проведения мирных ядерных взрывов в наше время и на ближайшее будущее. Однако, до последнего времени остаются нерешенные проблемы, касающиеся установления статуса этих объектов, вопросов управления и регулирования в области радиационной безопасности [117, 248-251].

Центральная зона ядерных взрывов является необустроенным подземным могильником, содержащим твердые и жидкие радиоактивные продукты – особые РАО. На ближайшие 70-90 лет радиоактивность центральной зоны определяют ^{90}Sr , ^{37}Cs и тритий. По уровням загрязнения осколочными радионуклидами породы зон обрушения и расплава центральной зоны соответствуют низко- среднеактивным отходам. Через 200-300 лет радиационную опасность будут определять долгоживущие α -излучающие радионуклиды [248].

Наиболее сложная ситуация, требующая постоянного контроля, складывается в случаях проведения взрывов на территориях разведанных или эксплуатируемых месторождений углеводородного сырья.

Квалификация центральных зон подземных ядерных взрывов как могильников особых РАО и как источников потенциального облучения определяет комплекс мер, направленных на обеспечение радиационной безопасности в будущем. К таким мерам, в первую очередь, следует отнести [249]:

- законодательное определение статуса объектов;
- административное закрепление подчиненности территории, примыкающей к местам проведения мирных подземных ядерных взрывов;
- определение горных отводов и санитарно-защитных зон;
- организацию периодического мониторинга объектов внешней среды и верхних водоносных горизонтов.

При создании требуемых нормативно-правовых условий современными техническими средствами обеспечивается безопасность объектов проведения подземных ядерных взрывов на ближайшие сотни лет. Законодательное утверждение технического и правового статуса этих объектов реализует окончательное захоронение техногенных радионуклидов, образованных при ядерных взрывах [117].

11.1.2. Долгосрочное прогнозирование

Долгосрочное прогнозирование условий изоляции радиоактивных отходов ядерно-взрывных технологии, как и всех других РАО, содержащих долгоживущие радионуклиды, до настоящего времени остается наиболее сложной научной проблемой. Её решение требует комплексного подхода с привлечением информации по различным направлениям научных исследований [132]. Прогноз на сотни тысяч лет – легко уязвим для критики. Общее недоверие вызывают сами сроки прогноза, трудно воспринимаемые в повседневной жизни. Существуют сомнения в самой необходимости разработки долгосрочного прогноза, поскольку за 100 тыс. лет произойдут непредсказуемые изменения существующей цивилизации со всеми вытекающими последствиями (научно-технический прогресс, инженерно-технические возможности, оценки риска и пр.).

Существуют и веские причины, по которым долгосрочный прогноз безопасности необходим. Международная стратегия удаления радиоактивных отходов определила принцип ответственности перед будущими поколениями, который запрягает перекаладывать на будущие поколения деятельность по сохранению геотехнологических систем подземной изоляции [252]. На базе существующих научных знаний должны быть определен долгосрочный прогноз условия безопасности радиационно-опасного «наследства».

Кроме того, размещая долгоживущие радионуклиды в геологических формациях, мы изолируем их от биосферы, частью которой является человек на всех уровнях своего развития.

Существует и актуальная современная причина долгосрочного прогнозирования. Для принятия решений и убеждения общественности в необходимости подземной изоляции долгоживущих радионуклидов необходимо доказать, что разработанный прогноз основывается на научном понимании того, что произойдет в литосферном блоке за время, многократно превышающее существование известных нам цивилизаций. Научные принципы прогнозирования хорошо известны, однако

количественные оценки ограничены нашим пониманием геологии, тектоники, геохимии [166].

Прогноз базируется на выявленных закономерностях эволюции земной коры, законах формирования и развития геологических тел, естественных природных ритмах [253]. При этом необходимо учитывать, что глобальная геотектоническая цикличность, проявление эвстатических, климатических, тектоно-магматических и других процессов определяется и контролируется планетарными и космическими ритмами [254].

Следует учитывать различные оценки геологических факторов. С одной стороны естественные изменения земной коры и перестройка литосферных блоков происходят медленно и на протяжении многих тысячелетий не могут угрожать ни существованию человечества, ни целостности геотехнологических систем, расположенных на глубинах 900-1000 м от земной поверхности. Это – оптимистическая оценка прогноза.

Существует и пессимистическая оценка, которая считает, что, несмотря на стабильность геологических формаций в течение сотен тысяч и даже миллионов лет, надёжная прогнозная оценка их состояния на длительную перспективу остаётся проблематичной. В первую очередь это относится к проявлению экстраординарных событий, которые могут произойти за время перехода в стабильное состояние долгоживущих отходов с периодами полураспада свыше 10^5 лет [255].

Прогнозировать условия подземной изоляции радионуклидов на длительные периоды времени возможно геологическими методами, используя палереконструкции эволюционных, циклических и вероятностных процессов и событий. В геологической истории Земли интервал в 1 млн. лет – сравнительно небольшой отрезок времени для проявления литосферных тектоно-магматических циклов или существенного изменения формы и структуры литосферных плит.

За прошедший миллион лет наиболее четко выражены глобальные климатические изменения, которые, начиная с плейстоцена (1,6 млн. лет) приобрели ритмический характер. На рубеже одного миллиона лет происходит смена 41-тысячелетней цикличности изменения объема льдов в Северном полушарии на 100-тысячелетнюю. Цикличность климатических изменений связана с изменениями орбитальных параметров нашей планеты. Кроме того, сказываются влияние изменений конфигураций континентов, перестройка их рельефа с последующим изменением направлений воздушных потоков в системе океан – суша [256].

Начиная с эпохи прямой полярности Брюнес – около 790 тыс. лет назад, по данным морских изотопных стадий (МИС) и палеоклиматических записей оз. Байкал выделяются 9 холодных ледниковых и 10 теплых межледниковых периодов. Последние климатические стадии Северной Европы [257]:

- 350-225 тыс. лет – рисский межледниковый тёплый период;
- 225-105 тыс. лет – последняя стадия рисского максимального оледенения;
- 105-65 тыс. лет – рисс-вюрмское межледниковье;
- 65-32 тыс. лет – две стадии вюрмского оледенения (в восточной Европе – Валдайское оледенение);
- 30-20 тыс. лет – последний тёплый межстадиальный период верхнего плейстоцена (уровень Мирового океана 20 тыс. лет назад был ниже на 80-140 м, что связано с развитием последнего ледникового покрова на Земле);
- 12-10 тыс. лет – последнее похолодание верхнего плейстоцена;
- 12-9 тыс. лет – начало современного потепления в голоцене.

В последнее время уровень Мирового океана низкий, активность тектонических плит невелика. Весьма вероятно, что это период межледниковья. Современное потепление 1920-2035 гг. – это результат сложения теплых фаз климатических колебаний с периодами 230, 500 и 1000 лет [258].

С природными ритмами связаны колебания уровня Каспийского моря, последовательная смена трансгрессивных и регрессивных стадий. За четвертичный период, последние 1,6 млн. лет, Бакинское море сменилось Хазарским, затем Хвалынским и Новокаспийским (рис. 60). Границы Каспия, близкие к современным, сформировались ~ 15 тыс. лет назад.

Палеореконструкции произошедших геологических, тектонических, гидрогеологических и геоморфологических изменений рассматриваемого региона (Западного Прикаспия) за последний миллион лет позволяют на такой же промежуток времени прогнозировать сохранение условий существования солянокупольных структур. При низкой сейсмической активности должна сохраняться система подземной изоляции радионуклидов. Маловероятно, что морские трансгрессии будут способны разрушить закрытые соляные структуры. Более вероятны дополнительные осадки песчано-глинистых пород на перекрывающие купола отложения мелководных морей – Хазарского, Хвалынского и др.

Предварительные данные, используемые для долгосрочного прогнозирования, должны более детально рассматриваться в соответствии с критериями разработки прогноза для солевых формаций [112]. Эти же критерии целесообразно применить при оценках условий подземной изоляции РАО ядерно-взрывных технологий в процессе создания полостей-хранилищ.

Прогнозирование должно:

- соблюдать взаимосвязь и соответствие с базовыми геологическими критериями захоронения РАО и результатами изучения глобальных изменений в геологической истории [115, 252, 253];
- использовать реконструкции геохимической обстановки недавнего прошлого, включая их антропогенную часть [259];
- принимать в качестве основы, что нарушение изоляции в геологической среде наиболее вероятно в случае изменения параметров трех взаимосвязанных природных факторов – мигрирующих растворов и газов, тепловых потоков, взрывных нарушений.

В соляных породах нарушение подземной изоляции может быть связано с проявлением разрывных дислокаций, проходящих непосредственно через участок захоронения РАО, и проникновением по этим разрывам значительных объемов пресных вод. Для геолого-тектонических, сейсмических и гидрогеологических условий объектов проведения подземных ядерных взрывов на территории Западного Прикаспия такое сочетание негативных природных процессов не отмечено в прошлом и маловероятно в будущем [42]. В течение одного миллиона лет не может произойти кардинальная перестройка крупной геологической структуры. Используя принцип актуализма, при разработке прогноза следует принять, что если подземное захоронение расположено в пределах древней платформы, то и через сто тысяч, и через миллион лет на этой территории будет сохраняться платформенный режим с низкой сейсмичностью и плавными вертикальными движениями [260].

По аналогии с природными процессами представляется возможным проследить историю развития за последние миллионы лет преобладающего в настоящее

время семейства приматов – людей. Значительно трудней прогнозировать на тысячи лет вперед развитие научно-технических возможностей человека, деятельность которого, начиная с XX века, необходимо учитывать в общем комплексе грядущих изменений не только атмосферы, гидросферы и биосферы, но и литосферы [261]. Гоминиды (*Homo erectus*) заселили Европу 1 500-700 тыс. лет назад. За время своего существования человек достиг таких технических возможностей, что сам должен ограничивать негативные влияния на природные процессы техногенных факторов.

Колебания уровня моря и связанные с ними изменения климата – часть глобальной автоматически регулируемой системы, в которой объединены литосфера, гидросфера, атмосфера и биосфера. Вмешательство в эти процессы может оказаться непредсказуемым и пагубным для наиболее чувствительного компонента системы – биосферы, а следовательно, и самого человечества. Проблема в целом требует понимания таких вопросов, как устойчивость, уязвимость и динамичное взаимодействие между природой, технологией и обществом. Разработанная концепция устойчивого развития подразумевает неограниченно долгое существование и развитие человечества. Следовательно, в прогнозируемом будущем для оценки безопасности подземной изоляции долгоживущих радионуклидов необходимо учитывать человеческий фактор, и, в частности, возможность техногенного внедрения в места проведения подземных ядерных взрывов. При этом именно «человеческий фактор» составляет основную часть неопределенности в вероятностных модельных расчетах долгосрочного прогнозирования [262].

Для разработки прогноза необходимо определить терминологию таких понятий, как «опасный объект» и «защищаемый объект» [263]. При этом защищаемые и опасные объекты могут меняться ролями. Если рассматривать негативное влияние РАО на окружающую среду и людей, то последние – защищаемый объект, а отходы (или центральные зоны подземных ядерных взрывов) – опасный объект. Если же речь идет о внешних воздействиях, нарушающих подземную изоляцию РАО, то тогда окружающая среда, включая «человеческий фактор» становятся опасными объектами, а отходы – защищаемыми (рис. 98).

Радиоактивные отходы ядерно-взрывных технологий должны быть надежно и на длительные сроки защищены от внешнего воздействия. При этом само понятие «безопасность» и возможность воздействия на подземную систему изоляции радионуклидов будут различаться для различных временных параметров [132].

Безопасность на начальном, контролируемом промежутке времени обеспечивается последовательными действиями:

- определением текущего уровня безопасности – штатные условия;
- определение и обоснование нештатной ситуации или аварийной;
- перечень и обоснование принимаемых мер, активное вмешательство;
- принятие решений по ликвидации аварийной ситуации и неповторимости ее в будущем.



Рис. 98. Система защиты PAO от опасного внешнего воздействия [263].

В 2004 году для решения вопросов радиационной безопасности и мониторинга на объектах проведения ядерных взрывов в мирных целях предлагалось принять правительственное постановление, которое содержало бы следующие положения [250]:

- Агентству Российской Федерации по атомной энергии составить реестр (кадастр) проведенных ядерных взрывов в мирных целях и передать необходимые сведения о местах проведения взрывов, состоянии объектов и радиационной обстановке на этих объектах главам Администрации субъектов Российской Федерации и Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору.
- Министерству природных ресурсов Российской Федерации совместно с Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору и Федеральным Агентством по атомной энергии разработать и представить на утверждение Правительству Российской Федерации «Положение (временный регламент) об организации и осуществлении радиационной безопасности и государственного мониторинга на объектах проведения ядерных взрывов в мирных целях».

В 2009 году были предложены инженерные мероприятия, направленные на обеспечение радиационной безопасности на объектах проведения ядерных взрывов [117]:

- выделение специального (ограничительного) горного отвода;
- ликвидация скважин в зоне горного отвода;
- ремонт при необходимости технологических скважин с гидроизоляцией центральных зон взрывов от вышележащих водоносных горизонтов;
- радиоэкологический мониторинг.

Специальный горный отвод определяется как «охранный целик, включающий в себя часть недр, прилегающих к центральной зоне ядерных взрывов, содержащих локально расположенные запасы радионуклидов, образовавшихся в резуль-

тате ядерного взрыва, в котором запрещено ведение любого вида работ без согласования с органами Ростехнадзора, Роспотребнадзора и Федерального органа, ответственного за радиационный мониторинг». Выделение специального горного отвода направлено на исключение попадания техногенных радионуклидов в подземные воды, полезные ископаемые или в сферу деятельности человека, при оптимальном размере горного отвода в недрах. Размер специального горного отвода определяется отдельно для каждого проведенного ядерного взрыва или группы взрывов и зависит от геологических и гидрогеологических условий. По имеющемуся опыту максимальные линейные размеры горного отвода могут варьировать от ~ 300 м до 2-х и более км. При оценках размеров горного отвода в недрах, эксплуатация которых не предполагается, учитывается миграция радионуклидов по водоносным горизонтам. В малообводненных породах или в породах с застойными водами, в которых миграция радионуклидов происходит на небольшие расстояния, размеры горного отвода незначительно превышают зону интенсивного взрывного трещинообразования [117].

Предлагаемое введение нормативно-правовых актов и инженерно-технических мероприятий решает существующие задачи и частично задачи ближайшего будущего.

Для длительных периодов времени (более 100 тыс. лет) вопрос безопасности подземной изоляции радионуклидов «без опоры на контроль» решен далеко не полностью. На стадии активного мониторинга необходимо:

- определение возможности превентивного технического вмешательства в подземную систему изоляции для исключения заведомо прогнозируемых негативных явлений;
- осуществление современными техническими средствами изменений, улучшающих барьерные функции вмещающей геологической среды в далеком будущем.

Для подземных взрывов в каменной соли основным и доступным инженерно-технологическим вмешательством является отверждение полостных радиоактивных рассолов [136, 157]. Преобладающими радионуклидами рассолов являются ^{90}Sr и ^{137}Cs , что определяет продолжительность требуемой изоляции 300-500 лет. Более длительные сроки необходимы для делящихся изотопов, в частности для плутония. При этом геологические условия участка проведения взрыва предусматривают изоляцию без активного контроля, т.е. эти особые РАО пассивно безопасны.

Остается нерешенным вопрос продолжительности радиоэкологического мониторинга на всех объектах проведения мирных ядерных взрывов. Государственный стандарт Российской Федерации определяет мониторинг геологических формаций как часть мониторинга окружающей природной среды (экологического мониторинга) [247]. По этому принципу радиоэкологические наблюдения за радиоактивными отходами, размещенными в геологических формациях, включая особые отходы ядерно-взрывных технологий, должны быть объединены в Государственной системе мониторинга использования недр для изоляции промышленных и бытовых отходов. Сбор, обработку и анализ данных обеспечивает Государственный фонд данных государственного экологического мониторинга. Федеральными органами исполнительной власти обеспечивается хранение информации о состоянии окружающей среды.

Приказ Министерства природных ресурсов России от 21 мая 2001 г. № 433 «Об утверждении Положения о порядке осуществления государственного монито-

ринга состояния недр Российской Федерации» предусматривает обязанность ведения объектного (локального) мониторинга состояния недр для недропользователей и иных субъектов хозяйственной деятельности, влияющих на состояние недр. Условия, объемы и виды мониторинга определяются в процессе получения участков недр в недропользование.

Горные отходы объектов «Магистраль», «Сапфир» и «Вега» переданы ООО «Подземгазпром», которое будет вести мониторинг в течение всего времени эксплуатации месторождений и функционирования связанных с этими месторождениями предприятий. Для долгосрочного мониторинга объекты особых радиоактивных отходов должны перейти в систему Государственного экологического мониторинга.

Основными факторами нарушения долгосрочной изоляции отходов являются изменения сейсмотектонических и климатических условий. Сейсмотектоническая активизация сопровождается появлением разрывных нарушений (каналов миграции) в геологических структурах, а увеличение количества осадков может активизировать водообмен водоносных горизонтов.

Основные трудности возникают при составлении долгосрочного сейсмотектонического прогноза по причине вероятностного характера сейсмических событий и широкой известности последствий землетрясений населению. На сейсмоопасность территорий и непредсказуемость землетрясений, как правило, опираются противники строительства подземных ПЗРО.

Мониторинг сейсмического режима проводится для регионального и детального сейсмического районирования, а также для долгосрочного прогноза количественного обоснования места, времени и магнитуды ожидаемого землетрясения [247]. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации и всей Северной Евразии представлено в единой прогнозной карте сейсмичности и зон возникновения землетрясений [126].

Сейсмический мониторинг европейской территории России осуществляется 19 сейсмическими станциями и двумя сейсмическими группами. Сейсмичность Восточно-Европейской платформы распределена крайне неравномерно (рис. 99).

Восточно-Европейская равнина и Урал характеризуются относительно слабой сейсмичностью и редко возникающими здесь местными землетрясениями с магнитудой $M=5,5$ и менее. Такие явления известны на Среднем Урале, в Предуралье, Поволжье, в районе Азовского моря и Воронежской области. Периферия платформы более сейсмически активна. Это наблюдается, например, для Кольского полуострова и некоторых других участков окраин платформы.

Анализ палеоземлетрясений показал, что для Восточно-Европейской платформы в первую очередь необходимо учитывать влияние сейсмических событий, происходящих в южных регионах [265]. Сейсмические события на территории Центрального и Северо-Восточного Кавказа, произошедшие в 1668 и 1830 гг., ощущались в Калмыцких степях с интенсивностью до 7-8, а в низовьях Волги, у Астрахани – до 5-6 баллов.

Сильнейшее 9-10 балльное землетрясение в Западном Туркменистане ($M=7,4$) вызвали 5-балльные сейсмические толчки в Астрахани и Саратове, 4-балльные в Жигулях и в 3 балла в Казани. По представленным оценкам, возможность повторения подобных «наведенных» сотрясений составляет один раз в столетие.

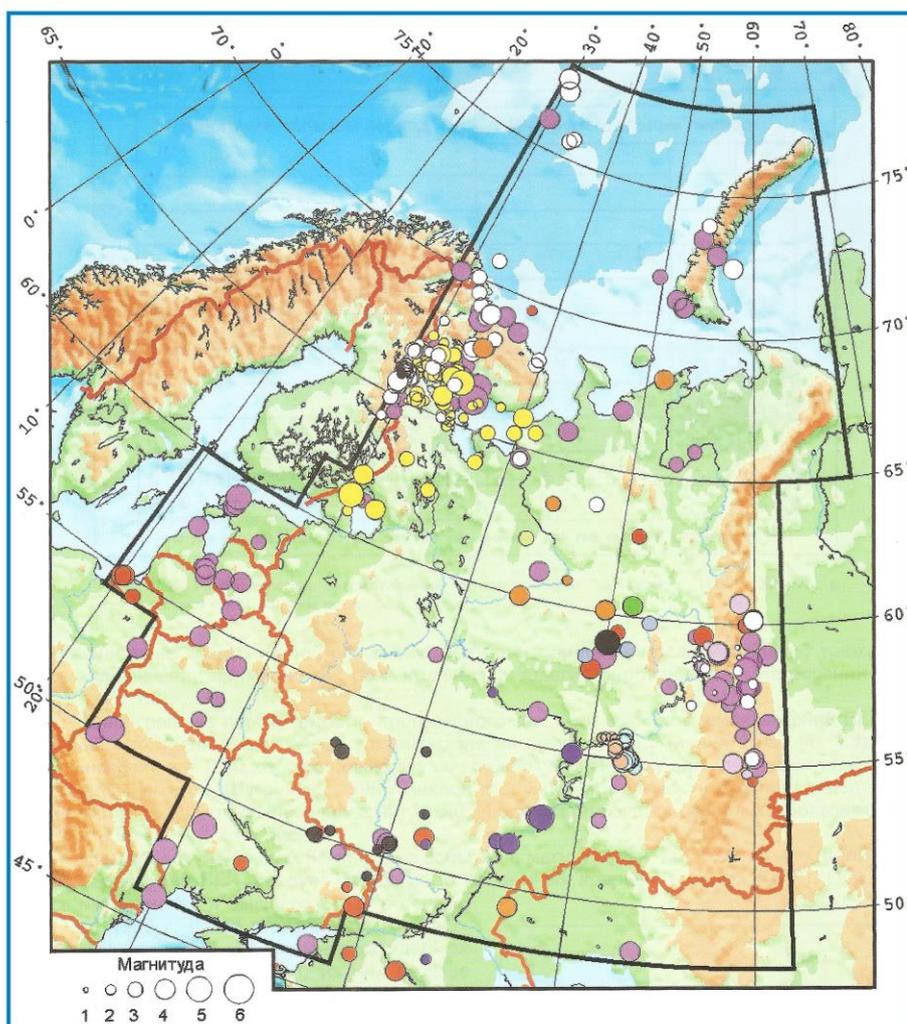


Рис. 99. Карта эпицентров землетрясений Восточно-Европейской платформы с 1467 по 2005 г. По данным [264]. Цвет эпицентров землетрясений соответствует определенным источникам информации, указанным в публикации. Фиолетовый цвет соответствует Специализированному каталогу с древнейших времен до 1995 г.

Близка к Восточно-Европейской платформе крупная сейсмогенерирующая зона на полуострове Мангышлак, где случались 9-балльные сейсмические события. Во время последнего из них в 1725 году толчки в Астрахани достигали 5-6 баллов. В настоящее время нет надежных оснований считать, что подземные толчки на Мангышлаке могут возбудить в Северном Прикаспии сотрясения свыше 6 баллов. Однако и они могут «повредить расположенные там подземные газовые хранилища, газоперерабатывающий завод и магистральные трубопроводы» [265].

Для Поволжского региона наиболее значительным за последнее время считается землетрясение, которое произошло 9 августа 1986 года вблизи районного центра города Нефтегорска Самарской области. В районе эпицентра сила подземного толчка достигала 5-6 баллов по 12-балльной шкале.

Признавая исключительно значение сейсмического фактора на безопасность атомных электростанций, Росатом планирует в 2013 году закончить разработку системы сейсмического мониторинга и удаленной защиты реакторных установок. Система будет выдавать сигнал для автоматического срабатывания аварийной защиты реактора при сейсмическом воздействии [266].

Очевидна необходимость сейсмического мониторинга для пунктов изоляции радиоактивных отходов различных типов, включая подземную закачку жидких отходов и особых отходов ядерно-взрывных технологий. В двух последних случаях необходимо учитывать связь сейсмических процессов с тектоническими структурами. В дальнейшем накопленные данные используются для геоинформационного моделирования и для составления сейсмических прогнозов [267]. Научные аспекты сейсмического мониторинга входят в общую систему норм и правил государственного мониторинга состояния недр Российской Федерации [268].

В обозримом будущем мониторинг состояния недр не потеряет своей актуальности, а приобретет еще большее значение для обеспечения безопасности технико-экономического развития. Включение в номенклатуру длительных наблюдений мест размещения особых отходов ядерно-взрывных технологий представляется оптимальным вариантом долгосрочного контроля. При увеличении сейсмической активности в районах проведения подземных ядерных взрывов необходимы дополнительные радиоэкологические исследования по оценкам условий изоляции радионуклидов на конкретных объектах.

11.2. Ликвидация негативных явлений

Анализ возможного ухудшения в системе подземной изоляции, возникшего в результате изменения сейсмического или какой-либо другого, например климатического, фактора требует технического вмешательства в геологическую среду для исключения прогнозируемых негативных явлений. Существующими техническими средствами необходимо внести изменения, которые смогут улучшить барьерные свойства природной среды на момент вмешательства и в будущем. На стадии разработки долгосрочного прогноза должна быть составлена программа превентивного технического вмешательства для исключения нарушения изоляции геотехнологической системы.

В последнее время широкое развитие получили теоретические и практические работы по изучению техногенного загрязнения недр и ликвидации негативных последствий миграции радионуклидов. Разработаны комплексные программы и планы реабилитации территорий крупных ядерно-промышленных центров и радиохимических комбинатов в Российской Федерации, США и других странах [269, 270]. Проведены исследования различных способов задержки, ограничения или замедления миграции загрязняющих веществ в подземных водах. Наиболее распространенными методами являются противодиффузионные и противомиграционные. Противодиффузионные методы включают создание перехватывающих и преграждающих систем и сооружение водонепроницаемых барьеров. Перехватывающие системы могут состоять из дренажных канав или водозаборных скважин, с помощью которых осуществляется откачка загрязненных подземных вод. При этом изменяется первоначальное направление движения потока загрязняющих веществ. Преграждающие системы создаются серией нагнетательных скважин, благодаря которым на пути движения загрязненных вод возникает сдерживающий барьер, изменяющий направление загрязненного потока. Противодиффузионные барьеры создаются нагнетанием через скважины специальных растворов, при твердении которых образуется барьер из водонепроницаемого материала. Воздействие на поток загрязненных вод противодиффузионного барьера аналогично воздействию преграждающих систем.

Противомиграционные методы обеспечивают задержку миграции или разложение определенных компонентов загрязненных вод, что достигается, например, сооружением геохимических и биогеохимических барьеров.

Выбор наиболее эффективного метода ограничения распространения техногенных загрязнителей зависит от поставленной задачи, от сложившейся гидрогеологической обстановки и геохимических условий в районе расположения источника техногенного загрязнения, а также физико-химических свойств и поведения загрязняющего вещества.

Разработаны горнотехнические и технологические методы, которые позволяют осуществлять разнообразные операции защиты недр и водоносных горизонтов – подземная кольматация разрывных нарушений, создание искусственных минерально-технологических завес и геохимических барьеров, изоляция подземных выработок от проникновения подземных вод водонабухающими полимерно-минеральными композитами и пр. [271–274].

Для подземных ядерных взрывов защитные мероприятия проведены в первую очередь для случаев с развитием аварийных ситуаций – «Глобус-1», «Кратон-3», а также на участках с радиоактивным загрязнением навалов и воронок взрыва – «Тайга», «Кристалл». Для проведения радиозоологических обследований с последующей разработкой методов ликвидации или ограничения радиоактивного загрязнения привлечены специалисты исследовательских институтов различных министерств и ведомств, Российской Академии наук и региональных специализированных учреждений [87, 117, 275, 276].

Существует опыт дезактивации и реабилитации площадки взрыва «Глобус-1», проведенного в 1971 г. в Ивановской области с целью глубинного сейсмического зондирования земной коры [275]. После проведения взрыва произошла разгерметизация затрубного пространства, по которому на поверхность была выброшена газоводяная радиоактивная смесь. Произошло загрязнение территории вокруг скважины в радиусе 10 м и прилегающего участка промплощадки размерами ~ 100×150 м в сторону ближайшей реки Шача. В 1977 г. проведена дезактивация территории, после чего возник необустроенный пункт хранения РАО. В 2003 г. был сооружен обводной канал для предотвращения размыва промплощадки.

В дальнейшем по периметру пункта хранения РАО сооружалась противофильтрационная завеса путем закачки через вертикальные скважины глубиной 18 м специальных растворов на основе силиката натрия. Над пунктом хранения сооружен многослойный защитный экран.

В период 1976-1977 гг. в зону взрыва были пробурены две исследовательские скважины И-1 и И-2. Скважина И-2 использовалась для закачки глинистого раствора в зону трещиноватости, образовавшуюся после взрыва в интервале глубин 550-540 м. По одному из разработанных вариантов заколонное и внутриколонное пространства двух скважин были перекрыты двумя цементными мостами. Первый возведен в подбашмачном участке колонны основной технологической («боевой») скважины для перекрытия каналов миграции радиоактивных растворов из зоны взрыва. Второй мост (бентонито-цементный) сооружен в интервале верхнего водопора 270-310 м – татарского яруса верхней перми (рис. 100).

Основная функция цементных мостов – противостоять давлению подземных пластовых вод, а также изолировать и сорбировать радионуклиды из фильтрующихся через них растворов. На устьях ликвидируемых скважин устанавливаются бетонные кубы (тумбы) с реперами высотой не менее 0,5 м с металлическими таб-

лицами с указанием номера скважины, предприятия-пользователя недр, даты их ликвидации согласно «Инструкции о порядке ликвидации, консервации скважины и оборудования их устьев и стволов», РД 08-492-02 (Госгортехнадзор России, 2002 г.).

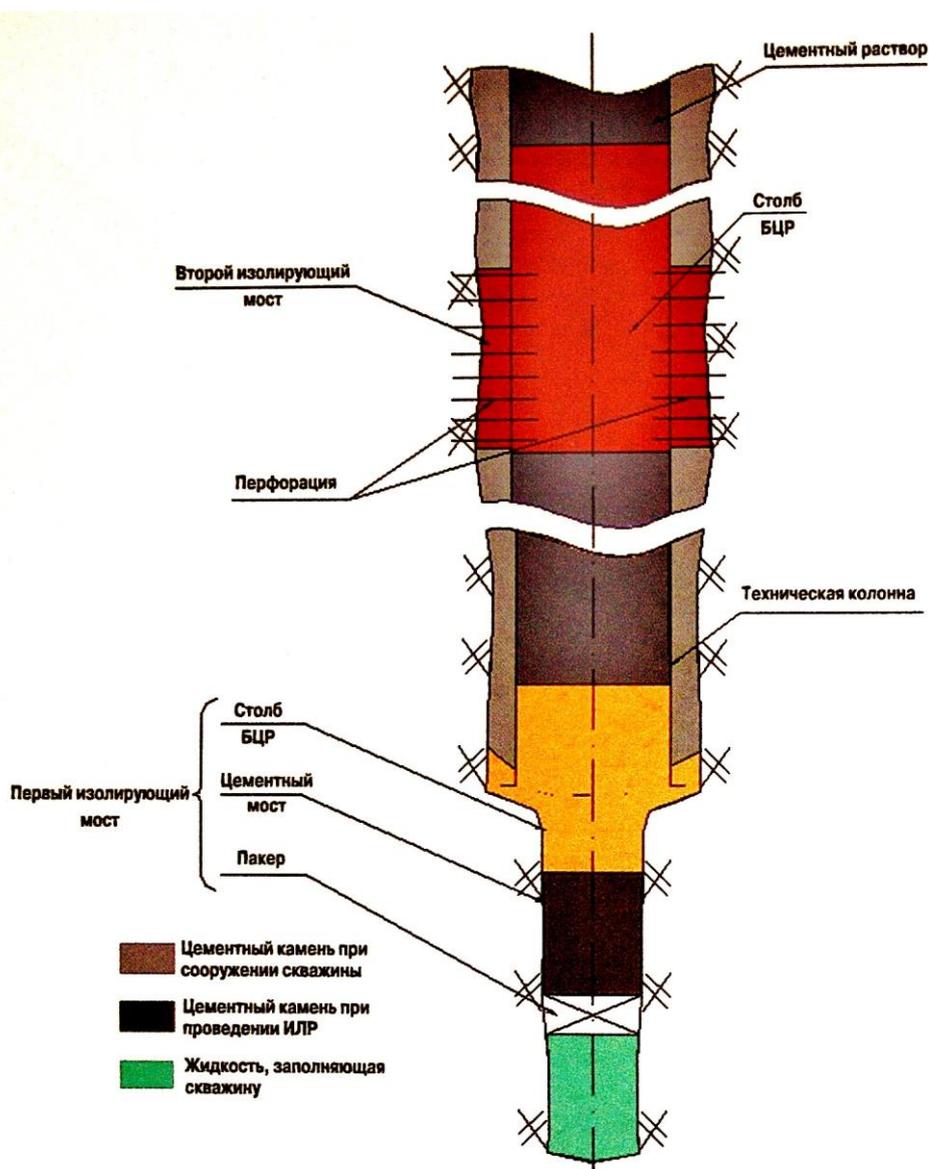


Рис.100. Состояние скважины после выполнения изоляционно-ликвидационных работ (ИЛР). Сокращение на рисунке: БЦР – бентонито-цементный раствор [275].

При взрыве «Кратон-3» выбросом радионуклидов через технологическую скважину площадь загрязненной поверхности составила около 5 км² [87]. В 1981 г. проведена первичная дезактивация площадки, основная часть загрязненного оборудования и верхний слой почвы были захоронены в траншеях. В 2007 г. центральная часть промплощадки была покрыта слоем гальки (толщиной 1,7 м) и двумя слоями синтетического тканевого материала. По границам загрязненного леса размещены знаки радиационной опасности. На объекте «Кратон-3» до настоящего времени проводятся комплексные научные исследования [276].

Мероприятия по дезактивации и рекультивации площадок проведения взрывов в каменной соли приведены ранее в главах 5-8.

Абсолютное большинство мирных ядерных взрывов были полностью камуфлетными и не вносили дополнительного радиоактивного загрязнения площадок и прилегающих территорий техногенными радионуклидами [87, 276].

Условия изоляции РАО ядерных взрывов не соответствуют жестким требованиям, предъявляемым к проектируемым и строящимся подземным могильникам с многобарьерной системой защиты. Однако общепринятый современный подход к обращению с РАО, направленный на освобождение от контроля (принцип «захоронить и забыть»), не может быть применен к отходам подземных ядерных взрывов. Все объекты проведения мирных ядерных взрывов требуют длительного радиоэкологического контроля.

11.3 Сохранение и оптимизация информации

С увеличением необходимого времени изоляции РАО возрастает уровень реализации маловероятных процессов и событий, как природных, так и техногенных. Одновременно возникает конкретная проблема сохранения информации, которая была ранее рассмотрена для хранилища WIPP [200].

В Российской Федерации сохранность информации обеспечивается специальной государственной системой, которая была создана по постановлению Правительства РФ от 11 октября 1997 г. № 1298 «Об утверждении Правил организации системы государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов». Основным документом ПЗРО любого типа, в том числе и особых отходов, является его паспорт, надежность хранения которого должна быть обеспечена государственной информационной системой.

В соответствии с фактическими данными состава РАО в хранилищах и нормативными документами Российской Федерации, расчет минимального времени хранения информации может быть произведен по изотопу ^{137}Cs и составляет не менее семисот лет. Более длительное хранение данных (на сотни и тысячи лет) обеспечивается созданием специальных информационных технологий [277, 278].

Надежность сохранности данных на такие значительные сроки обеспечивается процедурой резервирования с учетом непрерывного развития технологий хранения информации. Реализация задачи в целом осложняется огромным объемом информации уже имеющейся в системе государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов. Разработана информационная модель Единого хранилища информации системы государственного учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов, которая обеспечивает хранение паспортов РАО с описанием технологий их переработки и кондиционирования. Длительное хранение информации включает постоянное дополнительное профессиональное обучение специалистов на базе Центрального института повышения квалификации Госкорпорации Росатома и его филиалов [278]. Прямая передача накопленных знаний в цепочке смены поколений специалистов приобретает особую важность для такой сложной и многогранной проблемы, как обращение и удаление радиоактивных отходов.

Места проведения подземных ядерных взрывов, как и все участки подземного захоронения долгоживущих радионуклидов, должны по современным понятиям «навечно» сохранить не только архивно-документальную информацию, но и физические памятные знаки на местах их проведения. Выполнение этих требований значительно снижает возможность случайного или преднамеренного проникнове-

ния человека в центральную зону подземного взрыва. В настоящее время на местах проведения мирных ядерных взрывов устанавливаются бетонные тумбы, металлические столбики с табличкой, на которой сообщается, что буровые и прочие земляные работы запрещаются в радиусе 350-400 м. Промплощадки взрывов, проведенных в каменной соли, забетонированы и ограждены (рис.68, 70).

Эти информационно-предупредительные знаки временные и не рассчитаны на длительное существование. Для долгосрочного функционирования целесообразно использовать вариант, предлагаемый для WIPP – установку на скважинах и технологических площадках проведения подземных ядерных взрывов «мегалитов» – крупных блоков прочных трудновыветриваемых горных пород. На поверхности каменных блоков должна быть изображена (высечена) информация, ограничивающая доступ к центральной части взрывов. Несколько промплощадок (объект «Вега», восточный купол объекта «Галит») могут быть объединены в более крупные огражденные участки.

Блоки горных пород с изображениями и текстами на поверхности устойчивых горных пород хорошо сохраняются в течение тысяч и десятков тысяч лет (рис. 101). Известные строительно-информационные сооружения имеют возраст около 5 тыс. лет, в отдельных случаях – 8 тыс. лет. Метод исторических аналогий позволяет предполагать, что сооружения, построенные в наше время, могут просуществовать не менее 10 тыс. лет [279].



А



Б

Рис. 101. А – каменный истукан (Курский биосферный заповедник), <http://www.itogi.ru/archive/2005/36/58275/html>; Б – стела с иероглифами в Карнакском храме (Египет), <http://foto.mail.ru/sea-wolf/60/64/html> (время двух обращений 25.09.2013).

В наше время определенные трудности возникли в связи с большим объемом имеющейся информации по оценкам безопасности изоляции техногенных радионуклидов в геологических формациях. Специалистам и неспециалистам представлены широкие возможности высказать свое мнение в Интернете, в периодических

изданиях или отдельных публикациях. Общедоступная информация не всегда научно обоснована и достоверна. Наряду с рецензируемыми материалами хорошо известных институтов и научных учреждений Росатома, Российской Академии наук, специализированных региональных исследовательских центров существуют мелкие «кустарные» предприятия, претендующие на роль экспертов. Например, существует так называемое ООО «Научно-технический комплекс захоронения радиоактивных отходов в соляных формациях», который расположен в Санкт-Петербурге в квартире № 239 по Дунайскому проспекту в доме № 5 [280].

В различных регионах тиражируются одни и те же протестные заявления, которые трудно объяснить с позиций здравого смысла. Их суть – мы против строительства каких-либо новых, даже безопасных хранилищ РАО, но не имеем претензий к существующим многочисленным и потенциально опасным пунктами размещения радиоактивных отходов. Как правило, любые официальные заявления корпорации «Росатом» о предполагаемом строительстве новых безопасных хранилищ «повергают в шок экологов и общественность». В Интернете тиражируются заявления различных экспертов о пагубном влиянии любого перемещения уже существующих РАО на экологию, туризм, инвестиции и здоровье населения. Радикальные «зеленые» агитки с подтасованными фактами выдаются за критический анализ, вскрывающий «обман атомной энергии» [281].

Специалистам, работающим в области обращения и захоронения радиоактивных отходов, требуется многократно объяснять действительное состояние дел и свои позиции. Необходимо доказывать, что современные подземные хранилища создаются в соответствии с требованиями МАГАТЭ и они необходимы для повышения безопасности и улучшения радиозэкологической обстановки в конкретном регионе. Естественно, что для объективной информации используются результаты различных научных исследований, существующий отечественный и зарубежный опыт эксплуатации хранилищ, известные природные аналоги и пр.

Наличие многочисленной и разнообразной информации требует критического анализа материалов, относящихся к изоляции РАО в геологических формациях. Для выбора ограниченного числа публикаций с научно обоснованными данными необходимы оценки независимых экспертов – специалистов различных научных направлений.

Комплексных исследования какой-либо геологической формации или горной породы, как правило, включают несколько разделов исследований наук о Земле. Примером может быть тематика докладов II Всесоюзного солевого совещания (Новосибирск, 1982 г.) – «Новые данные по геологии, геохимии, подземным водам и полезным ископаемым соленосных бассейнов». В списке литературы одного из опубликованных докладов приведено 359 ссылок.

Уместно напомнить, что в исследованиях подземных ядерных взрывов в Радиевом институте им. В.Г.Хлопина участвовали специалисты всех трех отделов – химического, физического и геохимического. Для работ на объекте «Галит», кроме институтов Минатома, были привлечены в качестве исполнителей или консультантов сотрудники Всесоюзного научно-исследовательского и проектного института галургии, Ботанического института им. В.Л.Комарова РАН (Ленинград), Института радиационной гигиены Минздрава СССР (Ленинград) и др.

Сравнительно небольшой по объему препринт, дающий основные характеристики радиационной обстановки после завершения серии взрывов на соляноку-

польной структуре Большой Азгир, составлен «по данным 150 отчетов, выполненных в 1965-1990 гг. в Радиевом институте им. В.Г.Хлопина» [93].

Обилие и разнообразие существующей информации создают проблему ее оптимизации, выделения проверенных и научно подтвержденных данных, краткое содержание которых не исключало бы их значимую часть. Сокращение информации необходимо для связи и эффективного взаимодействия между сферой науки и руководящими сотрудниками, принимающими решения.

Суть проблемы можно объяснить на примере исследований площадки Юкка Маунтин в США [282]. За все время изучения этой потенциальной площадки для захоронения РАО было опубликовано более одной тысячи отчетов, сотни тысяч страниц текстов, таблиц и графиков. Возникает вопрос, каковы шансы, что сенаторы из комиссии, принимающей решения, прочтут сколько-нибудь значительную часть этих текстов? Информация для ознакомления подготавливается различными референтами с различным уровнем научной осведомленности по содержанию рассматриваемой проблемы. Есть ли уверенность, что краткая канцелярская информация будет адекватна выводам, полученным в результате многолетних комплексных исследований?

Нет сомнений, что проблема взаимодействия между наукой и аппаратом сотрудников, принимающих решение, существует не только в Соединенных Штатах, но имеет место быть и в Российской Федерации. Проблема подземной изоляции радиоактивных отходов в геологических формациях и по линии проведения научных исследований, и по своему технологическому воплощению чрезвычайно сложна. Подтверждением служит крайне медленная реализация подготовленных проектов, нерешенность многих вопросов, относящихся к уже существующим могильникам особых РАО ядерно-взрывных технологий.

Заключение

Соляные формации в настоящее время наиболее перспективны для подземной изоляции радиоактивных, в том числе и долгоживущих отходов. Природные геологические и гидрогеологические условия на территориях многочисленных соляных бассейнов обеспечивают сохранность водорастворимых галитовых пород в течение сотен миллионов лет. Наличие каменной соли создает в соляных структурах устойчивые гравитационные системы подземных вод, защищающие и изолирующие соляные залежи от горизонтов активного водообмена. Каменная соль имеет низкую проницаемость, а сами соляные формации являются водогазоупорами, разделяющими водоносные горизонты и создающими условия для накопления углеводородного сырья.

Сотни лет разрабатываются залежи каменной соли, являющейся ценнейшим полезным ископаемым, необходимым человеку. Освоены технические способы добычи в различных геологических и гидрогеологических условиях. В мире широко распространено создание крупных подземных полостей-хранилищ методом размыва соляных пластов. Соляные толщи используются для строительства подземных сооружений различного целевого назначения, включая уникальные медицинские учреждения.

Разработаны критерии, правила и нормы выбора благоприятных участков разработки полезного сырья и создания подземных сооружений, в основе которых заложены фундаментальные знания условий формирования, развития и изменения соляных формаций и накопленный опыт проведения горно-технических и технологических работ.

Определенный вклад в изучение соляных залежей внесли комплексные исследования, проводимые по программе мирного использования подземных ядерных взрывов. Условия изоляции особых радиоактивных отходов ядерно-взрывных технологий в значительной степени расширили наши знания о каменной соли как геологической среде для захоронения техногенных радионуклидов. Результаты изучения подземных ядерных взрывов, проведенных в каменной соли, подтвердили безопасность строительства в них подземных хранилищ РАО. Анализ соляных формаций показал их высокие изолирующие свойства и длительность процессов эволюционного развития специфических солянокупольных структур.

Каменная соль является первой геологической средой, используемой для подземной изоляции радиоактивных отходов. При этом в пластовых залежах пермских соленосных формаций США функционирует подземный комплекс WIPP, предназначенный для захоронения отходов, содержащих трансурановые элементы, гарантирующий изолированность РАО в течение сотен тысяч лет. Европейские ученые, занимающиеся вопросами геологического захоронения радиоактивных отходов, пришли к выводу, что природные барьеры соляных формаций обеспечивают безопасность захоронения на период от десятков тысяч до миллиона лет [283].

В настоящее время определились две различные по содержанию и методам решения проблемы удаления долгоживущих радионуклидов в геологические формации, включая отходы ядерно-взрывных технологий:

- разработка научно обоснованного долгосрочного прогноза безопасности подземной изоляции для конкретных геологических условий;

- обеспечение сохранности архивно-исторической и натурной информации о местах подземных могильников долгоживущих радионуклидов и площадок проведения подземных ядерных взрывов.

Проблемы, безусловно, сложные, и до настоящего времени полностью не решены. Однако сложность не означает невыполнимость, учитывая поступательное и постоянное развитие научных знаний и технических возможностей современной цивилизации.

Для решения общей проблемы безопасности подземных ядерных взрывов, проведенных в мирных целях, в том числе и взрывов в каменной соли, необходимо дальнейшее развитие научных исследований:

- по разработке и обоснованию долгосрочных прогнозов геологического развития регионов проведения взрывов и возможных изменений условий подземной изоляции техногенных радионуклидов;
- по использованию имеющегося опыта и разработкам новых технологий создания дополнительных инженерных барьеров для обнаруженного и предсказуемого распространения радионуклидов за пределы горного отвода;
- по обоснованию нормативно-законодательного статуса радиационного объекта мирных ядерных взрывов с обязательным сохранением архивной документации и созданием специальных информационно-ограничивающих знаков на местах их проведения.

Обоснование безопасности удаления радиоактивных отходов в геологические формации должно базироваться на результатах комплексных исследований в области наук о Земле, на анализе имеющихся проектов и пока еще не очень большом опыте эксплуатации существующих подземных хранилищ. Необходимо использовать в полной мере данные геологического изучения регионов, полученные при поисках, разведке и добыче различных полезных ископаемых. Прерогатива геологического фактора должна соблюдаться как на первых этапах выбора перспективных площадок, так и на конечных стадиях разработки долгосрочных прогнозов. Комплексные геологические и геохимические исследования являются определяющими для оценки безопасности подземной изоляции особых РАО ядерных взрывов, проведенных в соляных формациях.

Литература

1. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. М.: Изд-во АН СССР. 1962. 550 с.
2. Созанский В.И. Некоторые замечания по вопросам галогенеза // Геология и полезные ископаемые соленосных толщ. Киев: Изд-во «Наукова думка». 1974. С. 66–70.
3. Иванов А.А. Основные типы соленосных формаций. // Проблемы соленакопления. Новосибирск: Наука. 1977. Т. 1. С. 16–24.
4. Иванов А.А., Левицкий Ю.Ф. Геология галогенных отложений (формаций) СССР. М.: Госгеолтехиздат. 1960. 424 с.
5. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности солянокупольных бассейнов материков по геофизическим данным. Ред. Неволин Н.В., Кунин Н.Я.. М.: Недра. 1977. 136 с.
6. Иванов А.А., Воронова М.Л. Галогенные формации (минеральный состав, типы и условия образования; методы поисков и разведки минеральных солей). М.: Недра. 1972. 328 с.
7. Иванов Ю.А. Соленосные бассейны Евразии и их роль в формировании нефтегазоносных областей // Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления. Новосибирск: Наука. 1982. С. 6–15.
8. Мерзляков Г.А. Пермские соленосные бассейны Евразии. Новосибирск: Наука. 1979. 144 с.
9. Еремин Н.И. Неметаллические полезные ископаемые. М.: Изд-во МГУ, ИКЦ «Академкнига». 2004. 464 с.
10. Колодий В.В. Некоторые гидрогеологические особенности районов развития соленосных формаций // Геология и полезные ископаемые соленосных толщ. Киев: Изд-во «Наукова думка». 1974. С. 171–176.
11. Кулибакина И.Б. Факторы, определяющие приуроченность залежей углеводородов к бассейнам соленакопления // Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления. Новосибирск: Наука. 1982. С. 3–6.
12. Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т. О механизме соляной складчатости в Предуральском, Прикаспийском и Преддонецком прогибах // Геологический сборник № 6. Информационный материал. 2007. С. 68–73.
13. Хаин В.Е., Ломизе М.Т. Геотектоника с основами геодинамики. М.: Изд-во МГУ. 1995. 480 с.
14. Белоусов В.В. Структурная геология. М.: Изд-во МГУ. 1986. 243 с.
15. Orrell Andrew. A Brief Chronology of Sandia Activities Supporting Salt Science. US-German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation. May 25-27, 2010. Mississippi State University, USA. P.17–48.
16. Свиточ А.А. Четвертичная геология, палеогеография, морской плейстоцен, соляная тектоника. М.: РАСХН. 2002. 650 с.
17. Нефтегазоносность Прикаспийской впадины и сопредельных районов. М.: Наука. 1987. 192 с.
18. Корневский С.М., Воронова М.Л. Геология и условия формирования калийных месторождений Прикаспийской синеклизы и Южно-Предуральского прогиба. М.: Недра. 1966. 280 с.
19. Панов Б.С., Рябоштан Ю.С., Тахтамиров Е.П. и др. Новые методы изучения современной геодинамики активизированных областей // Советская геология. 1981. № 1. С. 69–75.

20. Отрешко А.И. Типы кепроков и перспективы сероносности солянокупольных структур // Геология и полезные ископаемые соленосных толщ. Киев: Изд-во «Наукова Думка». 1974. С. 196–204.
21. Тальбот К.Дж., Джексон М.П.А. Соляная тектоника // В мире науки. 1987. № 10. С. 40–50.
22. Короткевич Г.В. Соляной карст. Л.: Недра. 1970. 252 с.
23. Атеев А.Е. Геологическая структура и методика разведки эксплуатируемых месторождений каменной соли в СССР // Геология и полезные ископаемые соленосных толщ. Киев: Изд-во «Наукова Думка». 1974. С. 119–126.
24. Кривохатский А.С., Савоненков В.Г., Рогозин Ю.М. Геохимические аспекты использования залежей каменной соли для захоронения радиоактивных отходов. Киев: Препринт АН УССР, Ин-т геологич. наук. 1991. С.13.
25. Йордан Х., Пилот И., Шепе М. и др. Изотопы редких газов в гидрогеологии. М.: Мир. 1983. 75 с.
26. Дорохин В.М., Славянова Л.В. Роль соленосных формаций в формировании микрокомпонентного и изотопного состава рассолов Прикаспийской впадины // Новые данные по геологии, геохимии, подземным водам и полезным ископаемым соленосных бассейнов. Новосибирск: Наука. 1982. С. 56 – 61.
27. Richter D., Korner W. Disposal of Radioactive Wastes Produced in Nuclear Installations in the German Democratic Republic. IAEM-SM-207/44. Vienna. 1976.
28. Перспективы строительства подземных сооружений различного целевого назначения в соляных толщах. Киев: Препринт АН УССР, Ин-т геологических наук. 1989. 38 с.
29. Подземное захоронение токсичных твердых промышленных отходов (доклад). Москва: Государственный Комитет Совета Министров СССР по науке и технике (ГКНТ). 1976. 45 с.
30. Инструкция по проведению геологоразведочных работ при строительстве подземных хранилищ нефти, нефтепродуктов, сжиженных и природных газов в каменной соли. Л.: ВНИИГРИ. 1979. 28 с.
31. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. М.: СНиП 34-02-99. Дата введения 1999–07–01.
32. Волкова Е.А., Шуплик М.Н. Способы строительства подземных емкостей в отложениях каменной соли // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2012. № 7 (28). С. 16–20.
33. Литологические критерии оценки участков и перспективы строительства подземных сооружений различного целевого назначения в соляных толщах. Киев: Препринт АН УССР, ин-т геологических наук. 1989. 46 с.
34. Хрущев Д.П., Чабанович Л.Б. Подземное хранение гелия // Газовая промышленность. Август, 2009. <http://www.gas-journal.ru/08/635/2009> (время обращения 25.09.2013).
35. Мазуров В.А. Подземные газонефтехранилища в отложениях каменной соли. М.: Недра. 1982. 212 с.
36. Калининградское подземное хранилище газа. <http://www.ленгазспецстрой.рф/objects/list/548/> (время обращения 25.09.2013).
37. Бетехтин А.Г. Минералогия. М.: Госгеолиздат. 1950. 956 с.
38. Минералы: Справочник. М.: Наука. Т. I – V. 1960 – 2004.
39. ОАО «Илецксоль». <http://soliopt.ru/lecksol/> (время обращения 15.11.2012).

40. Пшибрам К. Окраска и люминесценция минералов. М., «Иностранная литература». 1959. 458 с.
41. Аполлонов В.Н., Коцуг Д.Г. Исследования окраски галита и сильвина калийных месторождений // Физико-химические закономерности осадконакопления в солеродных бассейнах. М.: Наука. 1986. С. 44–52.
42. Савоненков В.Г., Кривохатский А.С. Локализация радиоактивных продуктов (отходов) в соляном куполе Азгир: Препринт РИ-235. М.: ЦНИИАтоминформ. 1993. 48 с.
43. Петриченко О.И. Атлас микровключений в минералах галогенных пород. Киев: Изд-во «Наукова думка». 1977. 182 с.
44. Махнач А.А. Стадиальный анализ литогенеза: Учебное пособие. Минск: БГУ. 2000. 255 с.
45. Гегузин Я.Е., Дзюба А.С., Кружанов В.С. Исследования поведения жидких включений в кристалле в поле температурного градиента // Кристаллография. 1975. Т. 20, № 2. С. 383–391.
46. Antony T.R., Cline H.E. Thermal Migration of Liquid Droplets Through Solids // J. Appl. Phys. 1971. V.42, No 9. P. 3380–3388.
47. Никифоров А.С., Поляков А.С., Кащеев В.А. и др. Миграция включений рассола в соляной среде хранилища радиоактивных отходов. Обзор. М.: ЦНИИАтоминформ. 1987. 55 с.
48. Вовк И.Ф. Радиолиз подземных вод и его геохимическая роль. М.: Недра. 1979. 231 с.
49. Disposal of High-Level Waste from Nuclear Power Plants in Denmark. Salt Dome Investigations. Report by EISAM. 1981. V.1. 144 p.
50. Московский Г.А., Головин Б.А., Горяинов В.А. Опыт изучения включений в минералах солей по керну и шламу // Новые данные по геологии, геохимии, подземным водам и полезным ископаемым соленосных бассейнов. Новосибирск: Наука. 1982. С. 115–119.
51. Stripa Project TR 86-04. Executive Summary of Phase 1. SKB. 1986. 25 p.
52. Кривохатский А.С., Рогозин Ю.М., Брызгалова Р.В. и др. Каменная соль как среда для захоронения радиоактивных отходов // Радиохимия. 1982. № 5. С. 664–670.
53. Большая энциклопедия. Под ред. С.Н. Южакова. СПб.: 1904. Том.17. С. 654–657.
54. Геологический словарь. Под ред. К.Н. Паффенгольца и др. М.: Недра. 1978. 216 с.
55. Герлинг Э.К. Современное состояние аргонового метода определения возраста и его применение в геологии. М.- Л.: Изд-во АН СССР. 1961. 131 с.
56. Борщевский Ю.А., Борисова С.Л. О сохранности радиогенного аргона в сильвине // Геохимия. 1963. № 11. С. 1055–1060.
57. Бранд С.Б., Петров Б.В., Кривенцов П.П. Миграция радиогенного аргона из сильвина под влиянием стресса // Геохимия. 1966. № 11. С. 1365.
58. Крылов А.Я., Мазина Т.И., Силин Ю.И. Калий-аргоновый возраст соляных отложений как индикатор соляной тектоники // Геохимия. 1984. № 2. С. 269–271.
59. Травникова Л.Г., Прасолов Э.М. Химический состав газов соленосных отложений // Геохимия. 1985. № 12. С. 1766–1778.

60. Вассербург Г. Определение возраста по отношению $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$ // Ядерная геология. Пер. с англ. Под ред. И.Е.Старика. М.: Изд-во Иностранной литературы. 1956. С. 448 – 458.
61. Сагирова Л.Р., Котенёв Ю.А. Классификация отложений солей, их состав и структура на месторождениях Ноябрьского региона // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 5. С. 189–195.
62. Миненко В.Г., Двойченкова Г.П. Применение кальций-хлоридных рассолов карьера «Удачный» в условиях эксплуатации Иреляхского нефтяного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. Семинар № 24. С. 372–380.
63. Сметанников А.Ф. Образование водорода при радиолизе кристаллизационной воды карналлита и возможные следствия этого явления // Геохимия. 2011. № 9. С. 971–980.
64. Сметанников А.Ф. Минералогия солей и благородных металлов Верхнекамского месторождения. Автореф. дис...д-ра геол.-мин. наук. Горный ин-т Уральского отделения РАН. Пермь. 2012.
65. Шорт Н.М. Ударные процессы в геологии // Взрывные кратеры на Земле и планетах. М.: Изд-во «Мир». 1968. С. 30–67.
66. Dietz R.S. Astroblesmes. // Scientific American. 1961. No 205. P. 50–58.
67. Фельдман В.И. Астроблемы – звездные раны Земли // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 9. С. 67–74.
68. Шарманов Б.Ф. Годограф планет Солнечной системы // Отечественная геология. 2003. № 1. С. 77–80.
69. Stoffler D. Coesite and Stishovite in Shocked Crystalline Rocks // J. of Geophys. Research. 1971. V. 76, No 23. P. 5474–5488.
70. Хрянина Л.П. Метеоритные кратеры на Земле. М.: Недра. 1987. 112 с.
71. Short N.M. Nuclear-explosion-induced microdeformation of rocks: an aid to the recognition of meteorite impact structures // Conf. NASA, April 14-16, 1966. P.185–211.
72. Kieffer S.W. Shock Metamorphism of the Coconino Sandstone at Meteor Crater, Arizona // J. of Geophys. Research. 1971. V. 76, No 23. P. 5449–5473.
73. Ядерные испытания СССР. Том 4. Использование ядерных взрывов для решения народнохозяйственных задач и научных исследований. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2000. 200 с.
74. Иванов Б.А. Механизмы образования ударных кратеров на Земле и планетах. Дис... д-ра физ.-мат. наук. Москва, ИФЗ РАН. 2000.
75. Ядерные испытания СССР. Том 2. Кол. авторов под рук. В.Н.Михайлова. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ. Издание Begell-Atom. 1998. 320 с.
76. Терминологический словарь по вопросам использования подземных ядерных взрывов в мирных целях (Глоссарий) Кол. авторов под рук. О.Л. Кедровского, М.П. Гречушкиной и Л.Б. Прозорова. М.: Отдел НТИ ЦНИИАтоминформа. 1981. 41 с.
77. Project Gnome and Sedan // The Plowshare Program. Defense Nuclear Agency USA. 1983. 134 p.
78. Киреев В.В., Ершов Н.Н., Протопопов Д.Д. Промышленные ядерные взрывы (зарубежные исследования). М.: Атомиздат. 1971. 174 с.
79. Нифонтов Б.И., Протопопов Д.Д., Ситников И.Е. и др. Подземные ядерные взрывы. М.: Атомиздат. 1965. 160 с.

80. Kenney J.W., Downes P.S., Gray D.H. et al. Radionuclide baseline in soil near Project Gnome and Waste Isolation Pilot Plant. EEG-58. DOE/AL/58309-58. Environmental Evaluation Group. New Mexico, July 1995.
81. Waste Isolation Pilot Plant Annual Site Environmental Report for 2010. U.S. Department of Energy, September 2011. 302 p.
82. Rawson D.E., Taylor R.W. and Springer D.L. Review of the Salmon Experiment A Nuclear Explosion in Salt. Die Naturwissenschaften. No 54. 1967. P. 525–531.
83. Vela Uniform Program Sterling Event. Analysis of Ground Motion and Containment. VUF-1035. Environmental Research Corp., May 3, 1968.
84. Rawson D., Randolph P., Boardeman C. et al. Post-explosion environment resulting from the Salmon event // J. Geophys. Res. 1966. V. 71, No 14. P. 3507–3521.
85. Атомные взрывы в мирных целях. Под ред. И.Д. Морохова. М.: Атомиздат. 1970. 124 с.
86. Кривохатский А.С. Радиохимия ядерных взрывов // Радиохимия. 1982. № 3. С. 277–286.
87. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении. Кол. авторов под рук. проф. В.А.Логачева. М.: ИздАТ. 2001. 519 с.
88. Ядерные испытания СССР. Том I. Цели. Общие характеристики. Организация ядерных испытаний. Первые ядерные испытания. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 1997. 123 с.
89. Савоненков В.Г. Техногенные радиоактивные продукты подземных ядерных взрывов. Дис...д-ра технич. наук. Ленинград. Радиевый институт им. В.Г. Хлопина. 1973. 270 с.
90. Гогоненков Г.Н., Талаев Ж.У., Шебалдин В.П. Современная геологическая интерпретация сейсмических данных в Прикаспийской впадине // Нефтегазосность Прикаспийской впадины и сопредельных районов. М.: Наука. С. 31–36.
91. Тектонические движения и новейшие структуры земной коры // Под ред. Н.И. Николаева. М.: Недра. 1976. 264 с.
92. Харузин А.Н. Степные очерки (Киргизская Букеевская орда). Странички из записной книги. М.: 1889. 551 с.
93. Кривохатский А.С., Соколов В.А., Ю.Г.Петров и др. Основные характеристики радиационной обстановки после завершения серии подземных ядерных взрывов в интересах народного хозяйства на соляном месторождении Б.Азгир (Казахстан). Препринт РИ-233. М.: ЦНИИАтоминформ. 1992. 19 с.
94. Мазина Т.И., Силин Ю.И., Крылов А.Я. Выделение газов при нагревании горных пород. Препринт РИ-130. Л.: Радиевый институт им. В.Г.Хлопина. 1980. 13 с.
95. Ушатский В.Н., Дубасов Ю.В. Участие в ядерно-взрывных программах СССР // Радиевый институт им. В.Г.Хлопина. К 75-летию со дня основания. СПб. 1997. С. 63–79.
96. Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г. Геохимические исследования. Там же, С. 119–132.
97. Павлов Д.И. Метаморфизм каменной соли в контактовых зонах долеритовых интрузивов и некоторые вопросы формирования железосодержащих гидротерм // Геология и полезные ископаемые соленосных толщ. Киев: Изд-во «Наукова думка». 1974. С. 204–208.

98. Белов Н.В. Кристаллохимия основного процесса кристаллизации магмы // Геохим. симпозиум «Геохимия редких элементов в связи с проблемой петрогенезиса». М.: Изд-во АН СССР. 1959. С.95–99.
99. I.Оперативные мероприятия I.1. Хронология оперативных мероприятий, проведенных Радиевым институтом в 1986 г. // Труды Радиевского института им. В.Г.Хлопина. Т. XIV. 2009. С. 5–9.
100. Anderson E.B., Savonenkov V.G., Rogozin Yu.M. et al. Analysis of Underground Nuclear Explosions in Rock Salt at the Azgir Site. NEA/EC Workshop on Field Tracer Experiments, GEOTRAP. Cologne, Germany, 28-30 August 1996. P.219–232.
101. Дубасов Ю.В., Савоненков В.Г., Смирнова Е.А. Вклад Радиевского института им. В.Г.Хлопина в разработку ядерно-взрывной технологии получения актинидов // Радиохимия. 2007. Т. 49, № 6. С.561–567.
102. Рогозин Ю.М., Захаренков В.Ф., Брызгалова Р.В. Теплопроводность и проницаемость горных пород, рассматриваемых в качестве среды захоронения радиоактивных отходов. Препринт РИ-124. Л.: Радиевый ин-т им. В.Г.Хлопина. 1980. 9 с.
103. Лобанова В.В. Роль пирокластического материала в формировании соляной толщи поднятия Западный Азгир // ДАН СССР. 1959. Том 125, № 5. С.1106–1109.
104. Butkovich T.R. Gas equation of state of natural material. The first Conference NASA, April 14-16, 1966. P. 83–87.
105. Половинкина Ю. Ир. Структуры и текстуры изверженных и метаморфических пород. Часть вторая, том 1. М.: Недра. 1966. 432 с.
106. Karraker D.G. Isotope recovery from a nuclear detonation in salt. United States, CONF-470-1. 1964.
107. Мейсон Б. Метеориты. М.: Мир. 1965.
108. Радиевому институту им.В.Г.Хлопина – 90 лет. 3.7.3. Геохимические исследования радиоактивных техногенных продуктов. 2013. С. 97-98.
109. Nathans M.W., Smith D.K., Kahn J.S. Iron minerals formed by a nuclear explosion in salt bed. United States, UCLR-14206. 1965.
110. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа. 1989. 528 с.
111. Anderson E.B., Savonenkov V.G., Silin Yu.I. Study of Structural Geochemical Characteristics of salt Rocks for Selection of Radioactive Waste Disposal Site. V.G.Khlopin Radium Institute, Leningrad, USSR. Prepared for CEC Conference, September 17-21, 1990, Luxembourg.
112. Anderson E.B., Karelin A. I., Krivochatsky A.S. et al. Forecasting the Space-Time Stability of Radioactive Waste Isolation in Salt Formations. Third Intern. Conf. – High Level Radioactive Waste Management. 1992. Las Vegas, Nevada. P. 2114–2121.
113. Anderson E.B., Savonenkov V.G., Shabalev S.I. Radioactive Waste Isolation in Salt Formations. Intern. Conf. “Disposal Technologies and Concepts” 1998, “Dis-Tec’98”. Hamburg, Germany, September 9-11, 1998. P. 284–289.
114. Савоненков В.Г., Андерсон Е.Б., Бураков Б.Е. и др. Изучение природных аналогов для захоронения долгоживущих радиоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 1998. № 3. С. 23–34.
115. Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes. IAEA, Safety Series No 60, 1983.

116. Савоненков В.Г. Разработка геологических критериев безопасного захоронения в соляные формации. Препринт РИ-126. Л.: Радиевый ин-т им. В.Г.Хлопина. 1980. 10 с.
117. Касаткин В.В., Камнев Е.Н., Ильичев В.А. и др. Подземные ядерные взрывы – проблемы окончательного захоронения радиоактивных продуктов // IV международный ядерный форум. СПб. НОУ ИДПО «АТОМПРОФ». 2009. С.147–149.
118. Hautojarvi A., Andersson P., Volckaert G. What Has Been Learned from Field Tracer Transport Experiments – A Critical Overview. NEA/EC Workshop on Field Tracer Experiments, GEOTRAP, Cologne, Germany, 28-30 August 1996. P.63–73.
119. Андерсон Е.Б., Савоненков В.Г., Любцева Е.Ф. и др. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж) // Тр. Радиевого ин-та им. В.Г.Хлопина. 2006. Т. XI. С. 8–64.
120. Никифоров А.С., Поляков А.С., Кашеев В.А. и др. Миграция включений рассола в соляной среде хранилища радиоактивных отходов. Обзор. – М.: ЦНИИАтоминформ. 1987. 55.с.
121. Свиточ А.А. Подземный феномен Прикаспийской впадины // Известия АН СССР, серия геологическая. 1965. № 9. С.61–65.
122. Ефремов Ю.К. Природа моей страны. М.: Мысль. 1985. 350 с.
123. Воронин Н.И. Особенности геологического строения и нефтегазоносность юго-западной части Прикаспийской впадины. Астраханский. Гос. техн. университет. Астрахань. Изд-во АГТУ. 2004. 164 с.
124. Природа и история Астраханского края. – Астрахань. Изд-во Астраханского Гос. педагогического института. 1996. 364 с.
125. Шило Н.А. Природа колебаний уровня Каспия // ДАН СССР. 1989. Т. 305, № 2. С. 412–416.
126. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации (ОСР-97). Под ред. В.И.Уломова. ОПФЗ РАН. 1998.
127. СН и ПП-7-81. Строительство в сейсмических районах. М.: Стройиздат. 1982.
128. Свиточ А.А., Селиванов А.О., Янина Т.А. Палеогеографические события плейстоцена Понто-Каспия и Средиземноморья. М.: МГУ. 1998. 291 с.
129. Мартынов А.Т. Закономерности распределения микроэлементов в соленосных отложениях различных литогенетических типов. Дисс...канд. геол.-мин. наук. Ленинград. Фонды ВСЕГЕИ. 1979.
130. Несмелова З.Н., Гемп С.Д. Вероятная модель формирования газовой составляющей соляных пород калийных месторождений // Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления. Новосибирск: Наука. 1982. С. 162–172.
131. Schneider L.R. In-situ Experiments HLW-Investigations. Russian Salt Experiments. US-German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation. May 25-27, 2010. Mississippi State University, USA. P. 845–870.
132. Савоненков В.Г., Андерсон Е.Б., Шабалев С.И. Проблемы долгосрочного прогнозирования безопасности захоронения РАО // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С.122–127.
133. Яншин А.Л., Шлезингер А.Е. Геологическая модель формирования Прикаспийской впадины (Проблемы и суждения) // Нефтегазоносность Прикаспийской впадины и сопредельных районов. М.: Наука. 1987. С. 5–11.

134. Готтих Р.П. Радиоактивные элементы в нефтегазовой технологии. М.: Недра. 1980. 253 с.
135. Бакиров Э.А., Ермолкин В.Н., Ларин В.И. и др. Геология нефти и газа. М.: Недра. 1990. 240 с
136. Корнеев А.Н. Патент Российской Федерации. № 2068099. 1996. <http://ru-patent.info/20/65-69/2068099.html> (время обращения 24.04.2013).
137. Федеральный портал PROTOWN/RU. Радиационная обстановка в Оренбургской области. <http://www.protown.ru/Russia/obl/articles/8307.html> (время обращения 24.04.2013).
138. Федоров Д.Л., Навроцкий О.К. Геолого-геохимические условия формирования Астраханского и Карачаганакского месторождений // Нефтегазоносность Прикаспийской впадины и сопредельных районов. М.: Наука. 1987. С. 107–113.
139. Мясников К.В., Родионов В.Н., Сизов И.А. и др. Анализ причин сокращения объемов подземных емкостей, созданных ядерными взрывами в массиве каменной соли на Астраханском газоконденсатном месторождении // Вопросы атомной науки и техники. Серия геоэкология. М.: Изд. ВНИПИПТ. 1998. Вып. 5. С. 16–29.
140. Кирюхин Л.Г., Капустин И.Н., Комисарова И.Н. Палеогеографические и палеотектонические условия формирования кунгурской соленосной формации Прикаспийской впадин и ее влияние на размещение залежей нефти и газа // Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления. Новосибирск: Наука. 1982. С. 40–47.
141. Айзенштадт Г. Е.-А., Слепакова Г.И. Структурно-генетические соотношения и связи надсолевых и подсолевых комплексов солянокупольных областей // Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления. Новосибирск: Наука. 1982. С. 31–40.
142. Кривохатский А.С., Савоненков В.Г., Дубровин В.С. и др. О результатах ядерных взрывов, проведенных на астраханском газоконденсатном месторождении для создания подземных хранилищ // Бюл. Центра общественной информации по атомной энергии. 1994. № 5-6. С. 51–53.
143. Глоба В.М. К вопросу определения допустимых давлений в газохранилищах, сооружаемых в каменной соли. // Известия вузов. Нефть и газ. 1974. № 1. С. 75–77.
144. Хуторской М.Д., Тевелева Е.А., Цыбуля Л.А. и др. Тепловой поток в солянокупольных бассейнах Евразии – сравнительный анализ // Геотектоника. 2010. № 4. С. 3–19.
145. Дорохин В.М., Славянова Л.В. Роль соленосных формаций в формировании микрокомпонентного и изотопного состава рассолов Прикаспийской впадины // Новые данные по геологии, геохимии, подземным водам и полезным ископаемым соленосных бассейнов. Новосибирск: Наука. 1982. С. 56–61.
146. Еремеев А.Н., Яницкий И.Н. Перспективы развития гелиометрических исследований // Советская геология. 1980. № 3. С. 18–28.
147. Титов В.К., Венков В.А., Авдеева Т.Л. и др. Экспозиционные эманационные методы поисков месторождений полезных ископаемых. Л.: Недра. 1985. 132 с.
148. Лопатин П.В. Особенности свойств массива соляных пород Сеитовского поднятия. Дис... кандидата технических наук. Москва. ФГУП ВНИПИПромтехнологии. 2004.

149. Горная энциклопедия. Главный редактор Е.А.Козловский. М.: Изд-во «Советская энциклопедия». 1984-1991 гг.
150. Битков В., Левченко Н. Есть ли будущее у ядерных взрывных технологий // Бюл. Центра общественной информации по атомной энергии. М.: 2000. № 1. С.8–14.
151. Свидзинский С.А. Закономерности строения и методика изучения галогенных комплексов солянокупольных регионов. Дис...д-ра геол.-мин. наук. Волгоград. ВолгГАСУ. 2001.
152. Касаткин В.В., Ильичев В.А., Мясников К.В. и др. Состояние обеспечения радиационной безопасности объектов промышленных ядерных взрывов, проведенных на предприятиях ТЭК в Российской Федерации // Конф. «Проблемы обеспечения радиационной безопасности ТЭК», 8-11 апреля 2003 г. Санкт-Петербург. С. 231–237.
153. О концепции комплексной долгосрочной целевой программы «Создание комплексной системы обращения с отходами Астраханской области на 2011-2015 годы и перспективу до 2020 года». Распоряжение Правительства Астраханской области 13.05.2011. 177-Пр.
154. Каехтина М.А. Анализ результатов инженерно-геологического мониторинга на полигоне захоронения жидких отходов в солянокупольных областях. Дис...канд. геол.-мин. наук. Волгоград, ВолгГАСУ. 2010.
155. Музалевская Л.В. Особенности строения и закономерности формирования основных структурных разностей каменной соли из галогенных разрезов кунгура. Дис...канд. геол.-мин. наук. Саратов. СГУ. 2001.
156. Гурин Д.Н. Геомеханическое обоснование экологической безопасности подземных хранилищ, созданных ядерными взрывами в отложениях каменной соли. Дис...канд. техн. наук. Москва. МГГУ. 2001.
157. Лапицкий А.А. Разработка и обоснование технологических параметров консервации и ликвидации подземных емкостей, созданных ядерными взрывами в каменной соли. Дис...канд. техн. наук. Москва. МГГУ. 2005.
158. Постановление главы Администрации Астраханской области от 11.07.1995 № 189 «О радиационной обстановке в Астраханской области, проблеме утилизации и ликвидации радиоактивных отходов».
159. Соколов В.Л., Хвилевичкий М.О., Барулин Г.И. и др. Выявление перспективных на газ структур во внутренней ботовой зоне Прикаспийской впадины по комплексу геофизических данных // Геофизический сборник. Изд. Саратовского Гос. ун-та. 1979. Вып. 2. С. 54–60.
160. ИЯФ РК разрабатывает ТЭО по закрытию полостей с газоконденсатом на Карачаганакском месторождении, образовавшихся в результате ядерных взрывов. <http://news.gazeta.kz/art.asp?aid=203254> (дата обращения 22.04.2013).
161. Национальный Научный Портал Республики Казахстан. «Ли́ра» под контролем. <http://nauka.kz/news/detail.php?ID=6435> (дата обращения 24.05.2013).
162. Солодухин В.П. Ядерно-физические методы в решении проблемы нефтяной отрасли и экологии Казахстана. Автореф. дис...д-ра физ.-мат. наук. Алматы. Институт ядерной физики НЯЦ РК. 2009.
163. Беляшов Д.Н., Мохов В.А., Мелентьев и др. Особенности геологического строения территории объекта «Ли́ра» и возможные пути миграции радионуклидов // Вестник НЯЦ Республики Казахстан. 2000. Вып. 2. С. 118–122.

164. Site Investigations, Design, Construction, Operation, Shutdown and Surveillance of Repositories for Low- and Intermediate-Level Radioactive Wastes in Rock Cavities. IAEA. Safety Series No 62. 1984.
165. Захоронение радиоактивных отходов. Нормы МАГАТЭ по безопасности. No SSR-5. Вена. 2011.
166. Rethinking High-Level Radioactive Waste Disposal. National Academy Press, Washington, US, 1990. 38 p.
167. Френкель М.Я. О термодинамике, динамике и математическом моделировании геохимических систем // Геохимия. 1992. № 10. С. 1401–1411.
168. Беккер К. Причины, следствия и терапия синдрома радиофобии // Атомная техника за рубежом. 2005. № 4. С.31–34.
169. Savage D. The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste. John Wiley & Sons. Chichester. 1996. 437 p.
170. Горский А.А., Звонова И.А. Критерии допустимого // Барьер безопасности. 2005. № 3-4. С. 82–85.
171. Масуда С., Умэки Х., Найто М. Надежность захоронения отходов высокой удельной активности в хранилищах глубокого заложения в Японии // Атомная техника за рубежом. 2001. № 2. С. 21–30.
172. Progress Towards Geological Disposal of Radioactive Waste: Where Do We Stand? An International Assessment. NEA OECD. 1999. 27 p.
173. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публикация 60 МКРЗ, Часть 2. М.: Энергоатомиздат. 1994. 208 с.
174. Проект концепции Федеральной целевой программы «Ядерная и радиационная безопасность России на 2007-2010 годы // Инф. Бюл. «Ядерная и радиационная безопасность России», М.: 2005, вып.3 (18). С.5–45.
175. Вихров А.И., Семенов В.Г. Радиационный риск в проблеме обеспечения безопасности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2001. Том № 3. С.5–16.
176. Кудрицкий Ю.К., Гергиевский А.Б., Карпов В.И. Адаптационная гипотеза биологической эффективности ионизирующего излучения // Атомная энергия. 1992. Т.73, вып.1. С. 27–32.
177. Astra-Novosti.ru/Астраханская подземная Хиросима, 26.09.2011 (дата обращения 22.03.2013).
178. Walner M., Brauer V. Nuclear Waste Disposal in Germany: Background, Status, and Future Research. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review. Ed. P.A. Witherspoon, G.S. Bodvarsson. Berkeley, California, USA. 2001. P.129–135.
179. Элерт К.-Х., Кнабе Х.-Ю. Газовые включения в породах цехштейна 2 и 3 (ГДР) // «Нефтегазоносность регионов древнего соленакопления». Новосибирск: Наука. 1982. С. 146–153.
180. Яутце Т., Вайсенборн А., Ханспер Ф. Возведение изоляционного сооружения в галите. <http://thyssen-schachtbau.com/ru/schachtbau-bohren/actuelles/150-2013-02-11-12-29-43> (время обращения 27.06.2013).
181. Brennecke P.W. Radioactive Waste Disposal Challenges in Germany. Intern. Conf. “Waste Management’2011”, Feb. 27 – March 3, 2011. Phoenix, Arizona, USA.. CD-ROM.

182. Нидер-Вестерманн Г.Х., Бьюррун Э., Боллингерфер В. Захоронение РАО в Германии // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С. 64–67.
183. Борнеманн О., Мингерцан Г., Белая И. и др. Соляной диапир Горлебен как потенциальный могильник для радиоактивных отходов в Германии – основные результаты геологоразведочных работ // Геоэкология. М.: Изд-во ИГЭ. 2004. С. 66–75.
184. Bornemann O., Behlau J., Fischbeck R. et al. Description of the Gorleben Site. Part 3: Result of the geological surface and underground exploration of the salt formation. BGR. Hannover. 2008. 223 p.
185. PAGIS Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste: Summary. ЕС. Luxembourg. 1988. 270 p.
186. Броскамп Х., Браммер К., Граф Р. Проблемы обращения с будущими отходами от работ по снятию с эксплуатации германских АЭС // Атомная техника за рубежом. 2005. № 4. С. 25–30.
187. Hansen F.D., Leigh Ch.D. Salt Disposal of Heat-Generating Nuclear Waste. Sandia Report SAND2011-0161, 2011. 70 p.
188. Concepts and Examples of Safety Analyses for Radioactive Waste Repositories in Continental Geological formations. IAEA. Safety Series No 58. 1983.
189. Patterson R.L. and Nelson R.A. An Update on the Geological Disposal of Radioactive Waste at the Waste Isolation Pilot Plant in Southeastern New Mexico, U.S.A. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review. Ed. P.A. Witherspoon, G.S. Bodvarsson. 2001. P. 313–318.
190. Ильенко Е.И., Царицына Л.Г. Нормативно-правовая база и критерии безопасности захоронения отходов, принятые при проектировании могильника WIPP (США). Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: Материалы КНТС / СПб.: 1999. С. 110–124.
191. Improving Operations and Long-Term Safety of the Waste Isolation Pilot Plant. Final Report. National Academy Press. Washington, D.C. 2000. 142 p.
192. Nuclear Regulatory Commission. Code of Federal Regulation, Title 10, Energy Part 60, Disposal of High-level Radioactive Waste Geological Repositories / Federal register. 1983, v. 48, No 120.
193. Экологические исследования на территории WIPP. <http://www.atomic-energy.complexdoc.ru/264909.html> (время обращения 11.07.2013).
194. Национальная лаборатория Айдахо избавляется от трансураниевых отходов. <http://www.atomic-energy.ru/news/2012/07/13/34792> (время обращения 07.07.2013).
195. Удаление трансураниевых отходов в США. <http://www.atomic-energy.complexdoc.ru/148118.html> (время обращения 07.07.2013).
196. Утилизация завода Rocky Flats позволила значительно уменьшить количество избыточного плутония в США. <http://www.mox26.net/2012/137> (время обращения 07.07.2013).
197. В США предлагается создать новое централизованное хранилище ОЯТ. <http://www.atomic-energy.ru/news/2012/10/05/36510> (время обращения 07.07.2013).
198. Ваганов П.А., Иейтс Э. Дж. О нормативных актах США, регулирующих захоронение высокорadioактивных отходов в геологических формациях / Правоведение. 1996. № 3 (214). С. 161–168.

199. Disposition of High-Level Waste and Spent Nuclear Fuel. The Continuing Societal and Technical Challenges. National Academy Press, Washington, D.C., 2001. 198 p.
200. Waste Isolation Pilot Plant. <http://www.wikipedia.org/wiki/> (время обращения 20.07.2013).
201. Alvarez R. Plutonium Wastes from U.S. Nuclear Weapons Complex // Science and Global Security. 2011. V. 19 P. 15–27.
202. Hageman B.P., van de Vate L. Retrievable Disposal of Radioactive Waste in the Netherlands. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review. Ed. P.A. Witherspoon, G.S. Bodvarsson. 2001. P. 199–203.
203. Jrbashyan R.T., Ghukasyan Yu.G. Some Geological Aspects of Underground Disposal of Radioactive Waste in the Republic Armenia. Ibid. P. 27–38.
204. Armenia Today [01.05.2011] <http://www.armtoday.info/default.asp?Lang> (время обращения 24.07.2013).
205. Kudelsky A.V. Geological Problems in Radioactive Waste Isolation for Belarus. Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation. Third Worldwide Review. Ed. P.A. Witherspoon, G.S. Bodvarsson. 2001. P. 39–46.
206. Поливко Л.А. О возможности использования геологической среды для решения проблемы обращения с радиоактивными отходами в Беларуси // Природопользование. 2012. Вып. 21. С. 199–205.
207. Беларуси необходима стратегия обращения с радиоактивными отходами. <http://www.chernobyl.by/news/912> (время обращения 25.07.2013).
208. Кислик В.В., Высоцкий Э.А., Лупинович Ю.И. Особенности строения и состав верхней соленосной толщи Припятской впадины // Доклады АН БССР. 1971. Т. XV, № 1. С. 54–56.
209. Варламов А.А., Козлов С.С., Петров Е.В. и др. Новые данные по геологии и гидрогеологии Старобинского месторождения калийных солей. М.: НИИТЭхим. 1981. 26 с.
210. Гишплинг Б.М., Литов Ю.Н., Лопушняк А.Г. Исследования процесса залечивания одиночной трещины в глинистой породе при фильтрации воды // Гидрогеология и охрана недр при разработке соляных месторождений. Труды ВНИИГ. Ленинград. 1976. С. 77–86.
211. Ракоскорпионы девонского периода в Беларуси, <http://dinosaurs.ru/sci/20091221166.html> (время обращения 30.07.2013).
212. Сатимола соляной купол. Актюбинская область, Казахстан, <http://www.webmineral.ru/deposits/item.php?id=1254> (время обращения 03.08.2013).
213. Жаксыклышское месторождение каменной соли в Казахстане, <http://astuz-m.kz> (время обращения 03.08.2013).
214. Об организации научно-исследовательского полигона по изучению возможности захоронения высокоактивных отходов в горном массиве Большой Азгир в Западном Казахстане. Аналитическая записка. Социально-экономический фонд «Единение России». М.: 2000, http://energy.seu.ru/rus/Laws/ed_rus/htm (время обращения 22.07.2013).
215. «Нарын» против захоронения радиоактивных отходов. <http://wap.gazeta.kz/newsArticle/151486/> (время обращения 22.07.2013).
216. Положение о порядке захоронения радиоактивных отходов в Республике Казахстан. Утверждено постановлением Правительства республики Казахстан от

- 18 октября 1996 г. № 1283. <http://adilet.zan.kz/rus/docs/P960001283> (время обращения 22.07.2013).
217. Спящий полигон Азгир продолжает отравлять жизнь азгирицев. <http://lomasm.ru/ruiny/tag> (время обращения 04.08.2013).
218. Программа «Экология Западно-Казахстанской области на 2005-2007 годы». Уральск. 2005 г. ecoinfo.iacoos.kz/lite/index.php?lt (время обращения 04.08.2013).
219. Н.Б. Кожаметов «Гигиеническая оценка загрязнения почвы радионуклидами, тяжелыми металлами и его влияние на здоровье населения региона ядерного полигона Азгир», <http://avtoreferats.com/article/view/id/13266> (время обращения 06.08.2013).
220. Михайлов А.И., Кириллов В.Ф., Сланина С.В. и др. Мониторинг здоровья населения в районе размещения радиационно опасных объектов // Безопасность окружающей среды. 2010. № 4. С. 110–113.
221. Отчет о НИР «Реконструкция дозовых нагрузок населения Азгирского региона для оценки последствий ядерных испытаний». РГП «Национальный ядерный центр», филиал «Институт радиационной безопасности и экологии». 2013. – 144 с.
222. Казахстан – отходное место? <http://articles.gazeta.kz/art.asp?aid=9514> (время обращения 04.08.2013).
223. Соленосные формации. Наиболее известные месторождения солей. <http://www.znanieplus.ru/freecat/ref-2056.html> (время обращения 10.08.2013).
224. Чечель Э.И., Машович Я.Г., Гилев Ю.Г. и др. Непский калиеносный бассейн Восточной Сибири и условия его формирования // Основные проблемы соле-накопления. Новосибирск: Наука. 1981. С. 113–121.
225. Информационно-аналитический центр «Минерал». Калийные соли. <http://www.mineral.ru/Facts/russia/131/283/index/html> (время обращения 10.08.2013).
226. Соль, добыча в Соль-Илецке. <http://solyanoy-kurort.ru/info/sol> (время обращения 10.08.2013).
227. Илецкая соль. Оренбургская область. http://www.orenobl.ru/p_isk/salt.php (время обращения 10.08.2013).
228. Петрищев В.П. Солянокупольный ландшафтогенез Прикаспийско-Предуральянского региона // Вестник Оренбургского государственного университета. 2007. № 3. С. 143–149.
229. Абдрахманов А.Р., Абдархманов А.Р., Будакова Г.А. и др. Соленые озера курорта «Соль-Илецк». Оренбург: Изд-во «Союз». 2008. 196 с.
230. Чибилев А.А., Павлейчик В.М., Чибилев А.А. (мл.) Природное наследие Оренбургской области: особо охраняемые природные территории. Оренбург: УрО РАН. Печатный дом «Димур». 2009. 328 с.
231. Иванов А.А., Воронова М.Л. Верхнекамское месторождение калийных солей. Л.: 1975. 219 с.
232. Верхнекамское месторождение – геологические памятники Пермского края. <http://pliku.com/pam058-1/htm> (время обращения 10.08.2013).
233. В выработке калийной шахты в Пермской области горняки обнаружили окаменелые деревья. <http://mineral.ru/News/5039/html> (время обращения 10.08.2013).

234. Филатов В.В., Кассин Г.Г. Предпосылки прогнозирования динамических событий на территории Верхнекамского месторождения калийных и калийно-магниевых солей // Рудник будущего. 2011. Вып. № 1 (5). С.71–74.
235. Лаптев Б.В. Аварийные ситуации на верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей, <http://www.ruspromexpert.ru/articles/articleavar-sit-na-meste-solej.html> (время обращения 13.08.2013).
236. Положение о Правительственной комиссии по недопущению негативных последствий техногенной аварии, вызванной затоплением рудника Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей в г. Березники (Пермский край). Утверждено 11 февраля 2013 года N 110. <http://docs.cntd.ru/document/499000213> (время обращения 15.08.2013).
237. Кудряшов А.И. Флюидогеодинамика и эпигенез калийных залежей (на примере Верхнекамского месторождения). Автореф. дис...доктора геол.-мин. наук. Екатеринбург. ИГ и Г УрО АН. 1994. 39 с.
238. Шнырев А.Н., Минихузин А.Н. Спелеоклиматическая камера «Палеозойский грот» в практике санаторно-курортного лечения // Курортные ведомости. № 1 (28). 2005. <http://kved.com.tesla.mtw.ru/php/content.php?id=528> (время обращения 10.08.2013).
239. Пат. 2152093 Российская Федерация. Способ захоронения радиоактивных материалов. Бялко А.В., Вертман А.А., Ефремов Е.Ю. и др. Некоммерческая организация социально-экономический фонд «Единение России»; Бюл. № 18, опубл. 27.06.2000.
240. Arnold B.W., Swift P.N., Brady P.V. et al. Into the Deep // Nuclear Engineering International. Feb. 2010. V.55, No 667. P.18–20.
241. Gibb F.G.F. New Scheme for Very Deep Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste // J. of Geological Society. 2000. V.157, No 1. P.27–36.
242. Литинский Ю.В., Ткаченко А.В. СБД: безопасная эксплуатация и надежное захоронение // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. 2011. № 1. С. 68–71.
243. Шабалев С.И., Савоненков В.Г., Смирнов И.В. Геотехнологические хранилище в каменной соли для малоиспользуемых продуктов ЯТЦ. Российская конф. «Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях». Москва, 15-16 октября 2013 г. М.: Изд-во «Граница». 2013. С. 148–149.
244. Газ упакуют в соль. «Эксперт Юг» № 34 (223). 2012 г. <http://m/expert.ru/south/2012/34/gas-upakuyt-v-sol/> (время обращения 04.02.2013).
245. Синяков В.Н., Беляева Ю.Л. О принципиальных подходах к инженерно-геологическому обоснованию размещения отходов производства и потребления в западном Прикаспии // Южно-российский вестник геологии, географии и глобальной энергии. 2003. № 3. С. 188–190.
246. Беляева Ю.Л. Инженерно-геологическое обоснование строительства современных полигонов хранения отходов в солянокупольных областях Автореф. дис...д-ра геол.-мин. наук. Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. 2005.
247. Государственный стандарт Российской Федерации. Мониторинг и прогнозирование опасных геологических явлений и процессов. Москва. ГОСТ Р 22.1.06-99. Дата введения 2000-01-01.

248. Касаткин В.В., Камнев Е.Н., Ильичев В. А. и др. Особые условия и требования при эксплуатации объектов топливно-энергетического комплекса, на которых были проведены подземные ядерные взрывы. 4-ый Международный форум «Топливо-энергетический комплекс России: региональные аспекты». СПб.: 6-9 апреля 2004 г. Сборник трудов. С. 256–263.
249. Репин В.С., Барковский А.Н., Брук Г.Я. и др. Радиационная обстановка на территориях, примыкающих к местам проведения подземных ядерных взрывов в мирных целях и проблемы установления статуса объектов. Там же. С. 266–268.
250. Камнев Е.Н., Касаткин В.В., Мамонов Б.П. и др. Основные положения радиационной безопасности при выводе из эксплуатации объектов проведения ядерных взрывов в мирных целях. VII Международная конференция «Безопасность ядерных технологий. Обращение с радиоактивными отходами». СПб.: 27 сентября – 1 октября. Доклады. PРо Атом. С. 256–258.
251. Касаткин В.В., Камнев Е.Н., Ильичев В.А. Места подземных ядерных взрывов – хранилища РАО, продуктов взрыва (краткая история, современное состояние, проблемы). II Международный ядерный форум. СПб.: ФГОУ «ГРОЦ». 2-5 октября 2007 г. С. 194–198.
252. Принципы безопасности и технические критерии для подземного захоронения радиоактивных отходов высокого уровня активности. МАГАТЭ. Серия безопасности № 99. 1990.
253. Тарноградский В.Д., Каплянская Ф.А. Глобальные изменения прошлого // Советская геология. 1992. № 6. С. 3–11.
254. Константиновская Л.В. Космические причины некоторых геологических процессов. Автореф. дис...канд. геол-мин. наук. Москва. МГУ им. М.В.Ломоносова. 1998 г.
255. Козарь А.А. Радиохимические и ядерно-физические параметры технологии рециклирования трансмутационных мишеней. Автореф. дис...д-ра технич. наук. Москва. ИФХЭ РАН. 2007 г.
256. Нагурный В.П., Белов Н.А. Изменение климата четвертичного периода в Арктике как следствие периодического поднятия северо-атлантических порогов и ограничения поступления атлантических вод в Северный Ледовитый океан // ДАН. 2000. Т. 373, № 3. С. 391–394.
257. Величко А.А., Лаухин С.А., Нечаев В.П. и др. Изменения палеотемператур северной Евразии в кайнозойе // ДАН. 1992. Т. 326, № 4. С. 688–691.
258. Бери Б.Л. Управление климатом, его прошлое и будущее. М.: Изд-во «Холод'ОК». 2008. № 1 (6). С. 72–78.
259. Кривцов А.И., Межеловский Н.В. Глобальные изменения в геологической истории – приоритетное направление научных исследований // Советская геология. 1991. № 7. С. 3–7.
260. Шарафутдинов Р.Б., Строганов А.А., Левин А.Г. и др. Геолого-геохимические аспекты захоронения радиоактивных отходов // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. М.: ВИНТИ. 1999. Вып. 5. С. 2–91.
261. Коптюг В.А. Конференция ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де Жанейро, июнь 1992 года). Информационный обзор. Новосибирск: СО РАН. 1993. 63 с.

262. Ваганов П.А., Иейтс Э. Дж. О нормативных актах США, регулирующих захоронение высокорадиоактивных отходов в геологические формации // Правоведение. 1996. № 3 (214). С. 161–168.
263. Пузанов Ю.В. О теории безопасности // Радиационная безопасность. 2005. № 3-4. С. 86–87.
264. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Под ред. Шарова Н.В., Маловичко А.А., Щукина Ю.К. Петрозаводск.: КарНЦ. 2007. 381 с.
265. Никонов А.А. Европейская Россия: сейсмическая опасность с юга // Наука в России. 2002. № 2. С. 73–78.
266. Росатом намерен создать систему сейсмического мониторинга и защиты АЭС. <http://regnum.ru/news/1491988.html> (время обращения 26.09.2013).
267. Варшанина Т.П. Система мониторинга современных тектонических и сейсмических процессов Северо-Западного Кавказа // Вестник Адыгейского государственного университета. 2007. № 4. Серия 4: Естественно-математические и технические науки.
268. «Об утверждении положения о порядке осуществления государственного мониторинга состояния недр Российской Федерации». Министерство природных ресурсов Российской Федерации. Приказ от 21 мая 2001 г. N 433. Зарегистрирован в Минюсте РФ 24.07.2001 N 2818.
269. Федеральный закон от 10 июля 2001 г. N 92-ФЗ «О специальных экологических программах реабилитации радиационно загрязненных участков территорий» (с изменениями от 30 декабря 2008 г.).
270. Petersen S.W., Morse J.G., Truex M.J. et al. Treatability Test Plan for Deep Vadose Zone Remediation at the Hanford Site's Central Plateau // Proc. Int. Conf. "Waste Management'08", Phoenix, Arizona, USA. February 24–28, 2008. Abstract # 8204.
271. Короткевич В.М., Зубков А.А., Козырев А.С. и др. Консервация открытых хранилищ среднеактивных отходов РХЗ // Мат. 6-ой научно-технической конф. Сибирского химического комбината (в 3-х частях). Часть 3. Северск: СТИ ТПУ, 2001. С. 73–78.
272. Обливанцев Д.Ю. Технология создания экологически безопасных хранилищ радиоактивных отходов с использованием барьера из глин. // Мат. VI Междунар. конф. «Новые идеи в науках о земле». М.: МГГРУ. 2003. С. 104.
273. Бернс Р.Е., Стедуэл М.И. Удаление радиоактивных отходов в Хэнфорде // Атомная техника за рубежом. 1957. № 4. С. 61–67.
274. Thompson K. M., Petersen S. W., Fruchter J. S, et al. Supplemental Groundwater Remediation Technologies to Protect the Columbia River at Hanford, WA // Proc. Intern. Conf. "Waste Management'07". Tucson, Arizona, USA. February 25–March 1, 2007. CD-ROM.
275. Лопатин П.В., П.В., Гармашева Н.В., Касаткин В.В. и др. Основные технические решения по реабилитации объекта «Глобус-1» (Ивановская область) // Ядерная и радиационная безопасность России. 2013. Выпуск 14. С. 65–73.
276. Рамзаев В.П., Репин В.С., Храмцов Е.В. Мирные ядерные взрывы: проблемы и пути обеспечения радиационной безопасности населения // Радиационная гигиена. 2009. Том 2, № 2. С. 27–33.
277. Быковский В.А. Информационная поддержка химических технологий безопасного обращения с радиоактивными отходами. Автореф. дис...канд. техн. наук. Москва. МИТХТ им. М.В.Ломоносова. 2012 г.

278. Таиров Т.Н. Информационная поддержка обращения с радиоактивными отходами // Интеграл. 2013. № 2. С. 28–31.
279. Калиберда И.В., Лёвина А.Г., Мурлис Д.В. и др. Внешние воздействия природного происхождения на глубинные захоронения долгоживущих радиоактивных отходов // Атомная техника за рубежом. 2003. № 2. С. 3–7.
280. ООО «НКТ «Захоронение РАО в соляных формациях» – Санкт-Петербург, <http://removecom.ru/company/0655193> (время обращения 25.11.2013).
281. Makhijani A., Saleska S. / Макхиджани А., Салеска С. – The Nuclear Power Deception / Обманы атомной энергии. 2000. Изд-во Нонпарель. 360 с.
282. Дублянский Ю.В. Захоронение радиоактивных отходов: проблемы и концепции в США и в России. <http://moderproblems.org.ru/ecology/31-radioact.html> (время обращения 27.11.2013).
283. Геологическое захоронение радиоактивных отходов – самый безопасный метод. <http://www.atomic-energy.ru/news/2011/10/26/27975> (время обращения 25.10.2013).

Владимир Григорьевич Савоненков
Станислав Игоревич Шабалев

Геохимические исследования подземных ядерных взрывов в каменной соли
как аналогов захоронения РАО в соляных формациях

Издательство «ООО «Вега»

Подписано к печати 01.09.2014 г.
Печ. Л. 34. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная.
Тираж 300 экз. Заказ № 592.

Отпечатано в типографии «Инфо Ол»
Санкт-Петербург, ул. Рентгена, д. 1
Тел. (812) 325-13-15