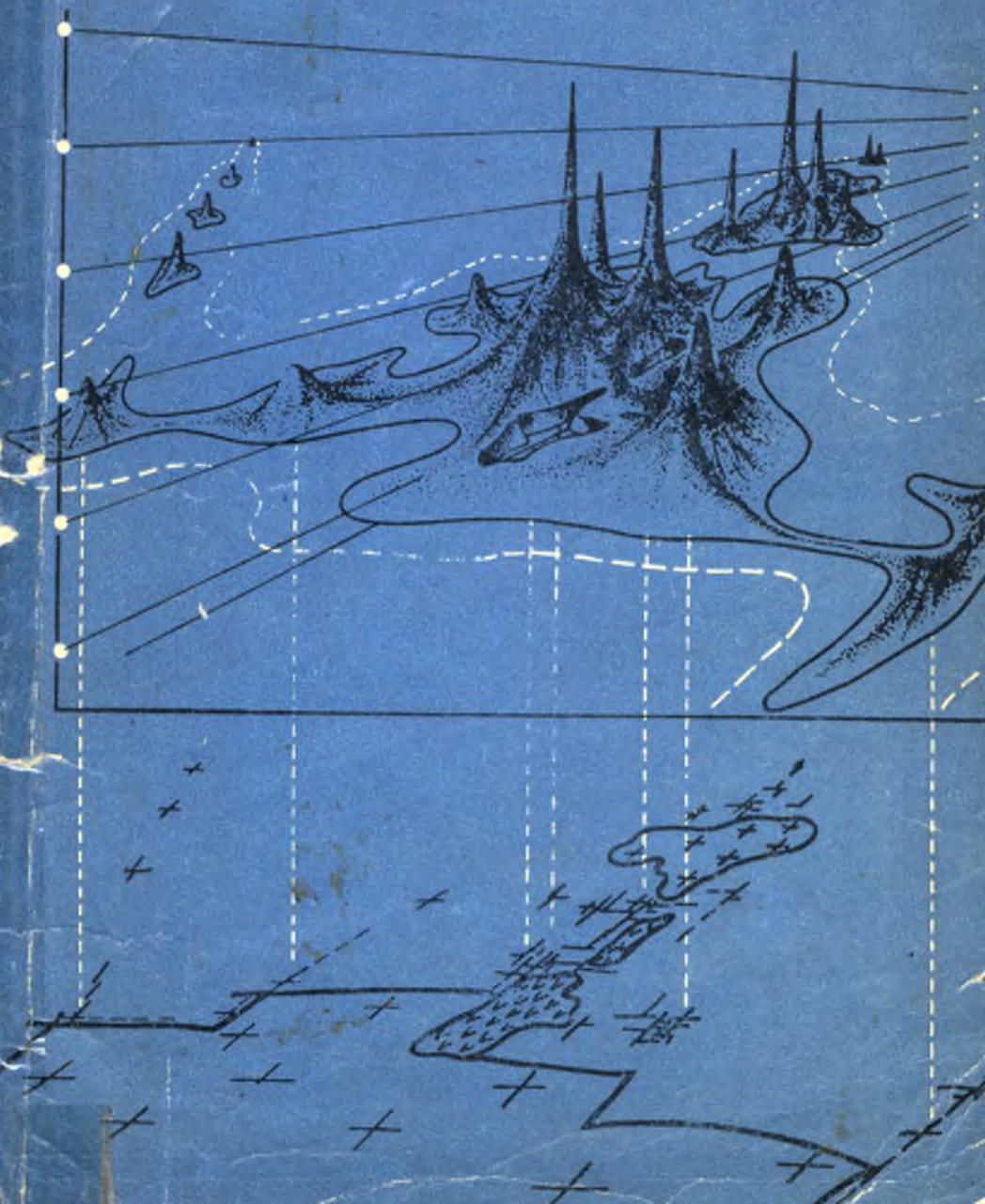


И. Н. ЯНИЦКИЙ

Гелиевая съемка



И. Н. ЯНИЦКИЙ

Гелиевая съемка



МОСКВА · «НЕДРА» · 1979

Яницкий И. Н. Гелиевая съемка, М., «Недра». 1979. 96 с.

В работе дан обзор развития гелиевой проблемы и изложены теоретические основы гелиевой съемки. Рассмотрены условия нахождения гелия в недрах Земли, источники его образования и способы миграции. Описаны приемы гелиевой съемки, построения карт поля гелия и анализа результатов для различных геологических условий. Приведены способы обработки данных с помощью ЭВМ, включающие автоматизированное построение карт в изолиниях концентраций гелия. Приведены карты для двух районов Советского Союза, в том числе составленных графопостроителем «Атлас». Важное значение при этом отведено унифицированным способам выражения интенсивности поля гелия — в единицах давления, информативных для всех сред и позволяющих учитывать абсолютную высоту участка гелиевой съемки.

Работа включает ряд оригинальных построений, развивающих содержание научного открытия (1969 г.) о связи аномалий гелия с глубинными разломами.

Книга предназначена для широкого круга геологов, геохимиков, гидрогеологов и геофизиков, работающих в области структурной геологии, геодинамики, прогноза месторождений эндогенных руд, а также залежей нефти, газа и воды. Она будет полезна для студентов и аспирантов перечисленных специализаций.

Табл. 17, ил. 30, список лит. — 80 назв.

20804—009
043 (01) — 79 1904050000

© Издательство «Недра», 1979

ИБ № 2931

Игорь Николаевич Яницкий
ГЕЛИЕВАЯ СЪЕМКА

Редактор издательства Л. И. Березовская
Обложка художника Ю. А. Ноздрина
Художественный редактор Е. Л. Юрковская
Технический редактор Л. Я. Голова
Корректор Н. И. Меренкова

Сдано в набор 22.08.78. Подписано в печать 14.11.78.
Т-20257 Формат 60×90^{1/16}. Бумага № 3
Гарнитура литер. Печать высокая. Печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,55
Тираж 2000 экз. Заказ 545/7242-2 Цена 35 коп.

Издательство «Недра» 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19

Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома
Государственного комитета СССР по делам издательства,
полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, 25

Развивающаяся в последние годы гелиевая съемка становится самостоятельным видом геологических исследований. Она выделилась из сложной, многогранной проблемы — геологии гелия, и направлена на изучение распределений концентраций этого инертного газа в доступной верхней части гидrolитосферы. Гелиевая съемка является разновидностью газовой съемки, широко применявшейся в 50-х годах. Наконец, по ряду решаемых задач и методике опробования гелиевая съемка тесно связана с гидрохимическими работами. Положение гелиевой съемки на стыке нескольких важных геологических дисциплин обогащает ее содержание и повышает общее значение проблемы газового дыхания Земли, поставленной В. И. Вернадским еще в 1912 г.

В работе изложены результаты исследований, в которых автор принимает непосредственное участие более 20 лет. За это время произошло полное обновление технических средств гелиевой съемки, изменились многие представления о ее содержании и решаемых с ее помощью задачах. Следует отметить постепенный, часто весьма сложный характер происходивших в этой области перемен, обусловленных противоречиями между существовавшими точками зрения и полученными в ходе эксперимента новыми фактами.

Не все новые данные принимались исследователями сразу, так как некоторые из них противоречили устоявшимся взглядам, например, гипотезе о связи локальных аномалий гелия с неглубоко залегающими радиоактивными источниками. Природа новых фактов становилась понятной только некоторое время спустя, когда они получали эффективное объяснение.

Полученные в области гелиевой съемки результаты достигнуты большим трудом многих исполнителей. Достаточно упомянуть, что в ходе полевых работ отобраны и проанализированы на гелий сотни тысяч проб, а первые варианты карт в масштабе 1:1 000 000 составлены для площади порядка 6 млн. км².

Связь аномально высоких концентраций гелия в литосфере с глубинными разломами земной коры определилась в конце 60-х годов уже как закономерность. На основе этой закономерности в 1969 г. было зарегистрировано научное открытие. Однако не все вопросы завершены в материалах этого открытия. Более того, качественно новые результаты работ стимулировали постановку оригинальных задач в смежных областях — геологии газов, гидрогеологии, геотектонике и др. Тем самым гелиевая съемка стала средством для решения комплекса геологических проблем, изучение которых только начинается.

Настоящая монография является пособием для ведения многоцелевых гелиеметрических исследований, которые могут проводить специалисты самого различного профиля.

Исторический обзор дает возможность проследить главную линию развития гелиевой проблемы с момента ее зарождения — выяснения причин столь сложного пространственного распределения гелия на Земле.

В главе II изложены вопросы, составляющие по существу теоретические основы гелиевой съемки, в том числе образование, миграция и баланс гелия. Обращено внимание на наличие нескольких форм нахождения гелия в недрах, что определяет варианты съемки. Такие варианты требуют разного методического подхода и позволяют получить различную информацию. Например, количество твердорастворенного гелия в минерале свидетельствует о плотности его кристаллической решетки и степени сохранности, в то время как концентрация свободного подвижного гелия во всех подземных фазах является критерием интенсивности его потока. Этим важным особенностям до последнего времени не придавалось значения. Последовательное рассмотрение материала дает возможность показать противоречия в распределении изотопов гелия, свидетельствующие о нерешенных вопросах в этой области. Такое положение можно объяснить тем, что доступный для прямых наблюдений верхний слой литосферы не превышает первых километров, в то время как зона питания этого слоя гелием уходит на глубину десятков километров.

В главе III описаны виды исследований потока гелия, в том числе варианты газовой, водной и керновой съемок. Обращено внимание на водогелиевую съемку, позволяющую наиболее эффективно изучать вариации потока гелия. Глава IV посвящена проведению водогелиевой съемки — отбору, транспортировке, хранению проб и их анализу. Показаны пути достижения максимальной чувствительности и воспроизводимости гелиеметрических работ: В главе V даны сведения о способах обработки результатов гелиевой съемки. Важное значение отведено выбору характеристики поля гелия. Предложена универсальная система выражения этой характеристики — в единицах упругости, что позволяет отражать вариации концентраций в многофазной природной среде газ — вода — порода. Показаны примеры построения карт поля гелия, в том числе с использованием ЭВМ.

В заключение рассмотрены результаты гелиевой съемки, выполненной в ряде регионов Советского Союза. Эти материалы дают дополнительную информацию об особенностях их геологического, структурно-тектонического и гидрогеологического строения. В частности, они позволили установить блоковую структуру земной коры, показать виды сопряжений разломов разного порядка и степени мобильности, уточнить положение в поле гелия участков локализации эндогенного оруденения, выявить характер динамики подземных вод, форму гидрогеологических окон и пр. Эти примеры иллюстрируют большие возможности гелиевой съемки, позволяющей эффективнее решать многие задачи, стоящие перед геологической службой.

Через 30 лет после открытия гелия в спектре Солнца (1868 г.) следы его были обнаружены на Земле почти одновременно — в атмосферном воздухе, эксгаляциях вулканов, газах угольных шахт, минеральных источников и в радиоактивных минералах (1897—1903 гг.). Из-за малых содержаний гелий считался тогда экзотическим элементом и особого интереса не вызывал. Поэтому справедливо считается, что начало геологии гелия положено работами Х. П. Кэди и Д. Ф. Макфарленда, обнаруживших в 1905 г. при исследованиях низкокалорийных горючих газов Канзаса (США) азот и значительные концентрации гелия (до 2 об. %). Это открытие вызвало определенный научный интерес к генезису гелия и стимулировало исследования в других странах.

Для анализа газа Х. П. Кэди и Д. Ф. Макфарленд использовали принцип вымораживания жидким воздухом основной части углеводородов с последующим поглощением азота на охлажденном до минус 180°C активированном угле. Газовый остаток представлял собой смесь гелия и неона и измерялся при атмосферном давлении объемным способом. Качество очистки проверялось в разрядной трубке спектральным анализом. Чувствительность способа не превышала 0,001 об. % гелия в исходной газовой фазе, причем ошибка, близкая к порогу чувствительности, могла достигать многократной величины. При более высоких концентрациях ошибка обычно не превышала ± 10 отн. %. В 1905—1907 гг. таким способом было исследовано несколько сотен эксплуатирувавшихся на горючий газ или заброшенных газовыделяющих скважин, что позволило наметить в центральной части США (область Мид Континент) площади весьма высокого гелиенасыщения (рис. 1). Затем работы в США прекратились из-за отсутствия интереса к практическому использованию гелия.

В Европе исследования были выполнены в 1909—1913 гг. на угольных и соляных копях Бельгии, Франции, Германии, а также по газовыделяющим скважинам и источникам. Наиболее важными здесь оказались работы Ш. Муре и А. Лепала (1914 г.), в частности, в связи с открытием ими максимальной для того времени концентрации гелия в азотном газе термальных источников Карно-Сантаней (до 10,3 об. %). Однако свободные подземные газы в Европе оказались слабогелиеносными — максимальная концентрация (0,38 об. %) была обнаружена в 1913 г. Е. Чако только в газовом месторождении Пешельброн (Эльзас).

Европейские исследователи изменили методику анализа гелия и вместо двухступенчатого полного вымораживания применили последовательное сорбционное поглощение активных компонентов газа с низкотемпературным разделением группы тяжелых инертных (аргона, криптона, ксенона) от легких (гелия и неона).

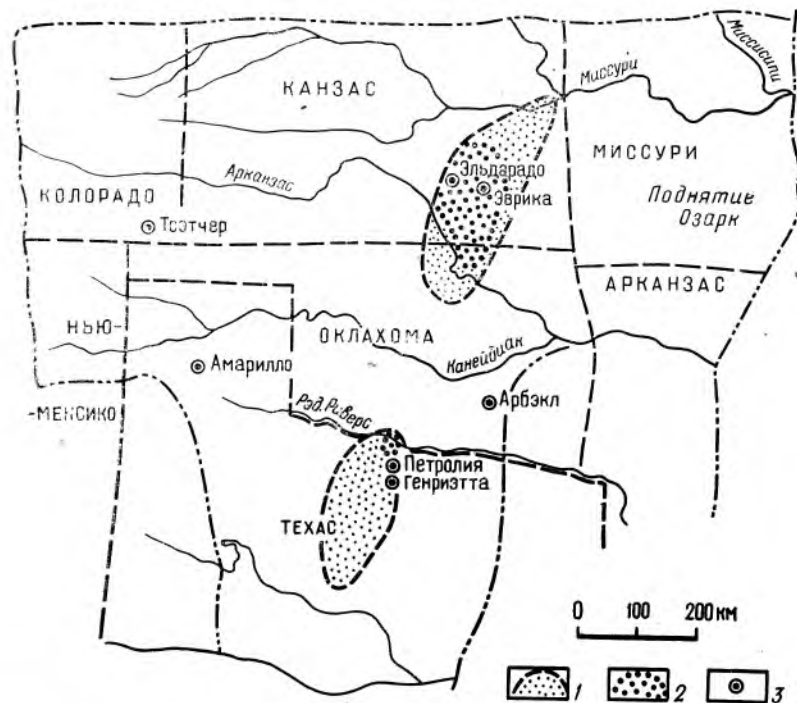


Рис. 1. Схема гелиеносности газовыделяющих скважин Мид-Континента (США) по Д. Ш. Роджерсу, 1935.

Области распространения газов с наиболее высокими концентрациями гелия: 1 — от 0,25 до 0,5 об. %; 2 — более 0,5 об. %; 3 — местоположение месторождений

Это позволило изучать компонентный состав природных газов. Автором метода был Ш. Муре.

По чувствительности и точности анализ по схеме Ш. Муре сопоставим с анализом по схеме Х. П. Кэди, однако параллельное определение компонентного состава газа расширило возможности метода. Поэтому при возобновлении работ (1914 г.) американские ученые использовали способ Муре. Этот классический метод анализа гелия используется с несколькими усовершенствованиями и в настоящее время в различных странах как контрольный при проверке новых способов.

В истории исследований гелия часто немалую роль играли конъюнктурные соображения. Впервые серьезно гелием занялись только в начале первой мировой войны, когда этот легкий взрывобезопасный газ был признан лучшим наполнителем дирижаблей. В связи с отсутствием месторождений гелиеносных газов в Европе немцы пытались извлекать гелий из воздуха (по методу Линде) и из монацитовых концентратов. Стоимость чистого гелия,

полученного таким путем, была крайне высокой, а количество его для наполнения дирижаблей — явно недостаточным.

Горное Бюро США вернулось в связи с этим к работам Х. П. Кэди и Д. Ф. Макфарленда; руководство геологической частью проблемы было поручено талантливому исследователю Д. Ш. Роджерсу. В 1915—1920 гг. было проведено массовое опробование газоносных скважин и обнаружено несколько месторождений с концентрацией гелия до 8—10 об. %. Тогда же был найден первый гигант по запасам гелия — месторождение Амарильо (или Клифсайд), получившее позже название Хьюгтон Пенхендл, с запасами в сотни миллионов кубических метров.

В 1921 г. вышла наиболее интересная работа по геологии гелия Д. Ш. Роджерса; русский перевод ее был издан в 1935 г. Это была полная сводка сведений того времени о распределении гелия в природных образованиях с обзором гипотез его накопления. Рассмотрим основные положения этой работы.

Среди первых месторождений гелиеносных газов, обнаруженных еще Х. П. Кэди и Д. Ф. Макфарлендом, Петролия и Генриэтта были достаточно локальными и хорошо изученными. Эти месторождения и окружающие их проявления гелия приурочены к коллекторам средне- и верхнепенсильванского возраста (пермь — карбон). В связи с таким распределением ряд исследователей сделали вывод о каких-то особых гелийпродуцирующих свойствах пенсильванских толщ и стали утверждать, что поиски гелия вне этой системы, особенно в более молодых породах, бесперспективны (первая гипотеза).

Однако вскоре пришлось отказаться от принципа стратиграфической привязки гелиевых месторождений к определенному горизонту, поскольку гелиеносность одной и той же свиты в совершенно аналогичных условиях оказывалась резко различной. Более того, интенсивное гелиенасыщение было обнаружено позже в коллекторах различного возраста — от палеозоя до верхнего мела включительно. При этом в некоторых случаях концентрация гелия в газах мезозойских коллекторов была выше, чем в палеозойских. Одновременно была установлена приуроченность высокой гелиеносности к определенным сочетаниям структур. В этих районах максимумы ее отчетливо тяготеют к областям сопряжения полого залегающих осадочных толщ с древними гранитными массивами. В других районах, где гелиевые месторождения были обнаружены далеко от выходов гранитных массивов, американские геологи пытались найти погребенные кристаллические структуры. В ряде случаев им удалось установить такую связь: например, месторождение Амарильо оказалось расположенным над погребенным гранитным массивом.

На основании этих фактов Х. П. Кэди и Д. Ф. Макфарленд следующим образом объяснили генезис месторождений гелиеносных газов: гелий образуется в подстилающих гранитных породах за счет распада радиоактивных элементов, находящихся

там в повышенных концентрациях; накопление гелия в вышележащих коллекторах происходит путем его восходящей миграции (вторая гипотеза).

Критический разбор обеих гипотез сделал Д. Ш. Роджерс. С одной стороны, он рассчитал вероятность такого процесса для условий месторождения Петролия и пришел к выводу, что содержащиеся в нем запасы гелия могли выделиться из подстилающих гранитов всего за 25 млн. лет. С другой стороны, Д. Ш. Роджерс привел несколько аргументов, отрицающих возможность образования месторождений гелия таким путем: во-первых, экспериментальные данные о весьма трудной отдаче гелия нерадиоактивными минералами и радиоактивной смолкой; во-вторых, очень убедительные факты, вскрывающие следующее логическое противоречие — если полагать, что гелий месторождения Петролия образовался от распада нормально рассеянных в породе радиоактивных элементов, то подобные скопления должны наблюдаться в структурных аналогах повсеместно.

Анализируя конкретную геологическую обстановку, Д. Ш. Роджерс пришел к твердому убеждению, что высокая гелиеносность Петролии и других месторождений явно указывает на наличие каких-то специфических условий. В поисках таких условий он предложил изучить следующие четыре гипотезы:

— гелий выделился из подстилающих гранитных пород, но только на отдельных участках их интенсивного прогрева, связанного с поствулканической деятельностью (третья гипотеза);

— гелий выделился из тех же подстилающих гранитных пород, но в связи с интенсивным дроблением их на отдельных участках в зоне мощных разломов (четвертая гипотеза);

— гелий образовался в гипотетических месторождениях радиоактивных элементов, приуроченных к некоторым подстилающим массивам гранитов (пятая гипотеза);

— гелий газовых месторождений генетически не связан ни с рассеянными радиоактивными элементами гранитов, ни со сконцентрированными в них рудами — он образовался на месте (в коллекторах) за счет обогащения грубообломочного материала коллекторов акцессорными радиоактивными минералами (шестая гипотеза).

Необходимо отметить, что полученные в то время экспериментальные данные о сохранности гелия в породе и минералах были весьма противоречивы. Тем не менее большинство исследователей считало, что достаточная отдача гелия кристаллической породой может быть только при интенсивном прогреве или дезинтеграции — объемном дроблении пород. В природе подобные явления могут происходить в связи с высокотемпературными ультраосновными интрузиями и в зонах крупных разломов. Однако Д. Ш. Роджерс отводил третьей и четвертой гипотезам не первостепенную роль. Главное внимание он уделил разработке пятой и шестой гипотез.

Для объяснения случаев сверхвысокой генерации гелия Д. Ш. Роджерс приводил известные факты повышения содержания радиоактивных элементов в гранитах и осадочных породах в 50—100 раз или допускал даже наличие в субстрате Мид Континента и плато Колорадо гипотетических месторождений радиоактивных руд. Все упомянутые генетические факторы гелиенакопления иллюстрировались примерами геологической ситуации центральной части США, где характерны крупные разломы, молодые интрузии базальтоидов, аномально высокие тепловые потоки и где уже тогда были известны значительные скопления вторичных урановых минералов — карнотитов.

Важно подчеркнуть, однако, что Д. Ш. Роджерс рекомендовал тщательно изучить связь гелия с радиоактивностью для проверки первого, наиболее простого и доступного объяснения генезиса гелиеносных газов. Он тогда уже приводил примеры балансовых расчетов Ш. Муре и А. Лепана (1911—1914 гг.) для гелия, содержащегося в угольных шахтах и в термальных источниках Франции; расчеты показали невероятно большие количества эквивалентного радиоактивного вещества, требуемого для обеспечения зафиксированных гелиеносных струй. Так, для получения количества гелия, выделившегося в шахте Франкольгольд только за учтенные 20 лет эксплуатации, понадобился бы распад радиоактивных веществ, находящихся в 33 млрд. т каменного угля, на протяжении 100 млн. лет, а для обеспечения потока гелия в источниках Карно Сантаней необходим постоянный распад 500 млн. т урановой смолки. Еще более невероятные цифры балансовых эквивалентов получались для месторождений США.

Поэтому Д. Ш. Роджерс в заключение генетического обзора, в частности, писал: «Из всех гипотез, которые были рассмотрены в предыдущем изложении, наиболее убедительными и подтверждающимися наибольшим количеством фактов являются следующие предположения: 1) гелий образуется из урана и тория, месторождения которых расположены вблизи горизонтов, заключающих в себе гелиеносный газ; 2) гелий существует искони и приходит из находящихся на глубине вместилищ... Автору этих строк первая гипотеза во многих отношениях представляется наиболее приемлемой... Но если невозможно будет доказать существование подобных месторождений... и если другие гипотезы не получают новых доказательств, то путем исключений придется обратиться к теории первичного гелия» (Роджерс, 1935, с. 101—102). Окончание этой цитаты выделено нами, поскольку данный вопрос остается открытым и в настоящее время, хотя теперь могут быть предложены для рассмотрения новые гипотезы в пользу как радиогенного, так и первозданного гелия (Бородзич и др., 1976).

В работе Д. Ш. Роджерса приведено несколько схем распределения концентраций гелия по площади для горизонтов на глубине 500—1000 м, построенных по данным опробования газовых

скважин. Это были первые попытки изображения поля гелия на значительной глубине*. В дальнейшем карты подобного рода строились весьма редко.

Трудной для работ раннего периода оказалась расшифровка распределения концентраций гелия в вертикальном разрезе. Первоначально возникло представление о максимуме гелиенасыщения всего на уровне 200—300 м и падении концентрации с глубиной. Позже В. П. Савченко и А. Л. Козлов (1933—1950 гг.) расшифровали эту геохимическую загадку, а исследования других авторов показали постоянный рост гелиенасыщения с глубиной.

В целом работа Д. Ш. Роджерса завершила начальный период становления геологии гелия и до сих пор поражает широтой анализа множества обсуждавшихся факторов аномально высокого гелиенасыщения. Ни одной подобной равноценной работы по проблеме гелия на Земле впоследствии не издавалось.

В середине 20-х годов наметился прогресс винтокрылой авиации, быстро вытеснившей дирижабли. Потеря единственного в то время потребителя гелия привела к закрытию действовавших в США заводов по переработке природных газов; одновременно значительно сократились исследовательские работы.

В царской России работы по гелию не проводились, хотя В. И. Вернадский дважды пытался поставить эту проблему перед Императорской Академией Наук. После Великой Октябрьской социалистической революции исследования начались благодаря указанию В. И. Ленина о создании при Академии наук Комитета по гелию, преобразованного позже в НТС по гелию при Госплане СССР. Максимального развития работы по гелию достигли в период 1933—1935 гг. К этому времени относятся интересные публикации В. И. Вернадского, В. Г. Хлопина, В. В. Белоусова, В. П. Савченко и др. Однако после 1935 г. работы в области геологии гелия сократились и в СССР.

Этот спад в развитии гелиевой проблемы продолжался до середины 40-х годов, пока не определились новые, стратегически важные сферы потребления гелия — атомная техника, ракетостроение, кессонные работы, качественная металлургия, физика сверхнизких температур. К 1960 г. производство гелия в США достигло 10 млн. м³ при перспективе увеличения до 20 млн. м³ ежегодно, что потребовало обеспечения крупных его запасов.

Следует подчеркнуть, что при значительном расширении поисковых работ в этот период американские специалисты не предпринимали попыток решения проблемных геологических задач. Их, видимо, не интересовали причины образования гигантских скоплений высокогелиеносных газов, содержащих около 4,5 млрд. м³ гелия и обнаруженных уже во всех стратиграфиче-

ских этажах бассейна Сан-Хуан (плато Колорадо и Мид Континент). Отдельные публикации носили констатационный характер и содержали лишь схематическое описание геологии обнаруженных месторождений (Dean, Lauth, 1961 и др.). Только известный геофизик Г. Кук (Cook, 1961) после ряда расчетов заявил, что подобные массы гелия по крайней мере на два порядка (!) превышают любые возможные количества радиоактивного вещества, которые можно допустить здесь в толще земной коры. В этой связи В. Дитон (Deaton, 1959) был вынужден предположить наличие достаточных по мощности радиогенных источников гелия в недрах.

Интересной в этом плане представляется работа геолога Б. Хитчона (Hitchon, 1963), показавшего с помощью статистического анализа определенную связь увеличения концентраций гелия в газовых залежах Канады вблизи фундамента. Введенный им «коэффициент положения» явился важным признаком ведущей роли в гелиенасыщении газомещающей осадочной толщи подстилающего кристаллического субстрата.

К другим важным публикациям конца 50-х годов следует отнести работы Т. Джеймса и Д. Гарриса по проявлениям высоких концентраций гелия в зоне Восточно-Африканских рифтов, а также работу П. Хюго (Huqo, 1963) по району Одентал-Рюст (Южная Африка). Эти работы были направлены на поиски крупных промышленных месторождений гелия, аналогов упомянутых месторождений США. Однако на том этапе поставленные задачи решены не были, хотя геологическая ценность полученной информации бесспорна.

За последние 10 лет новые заслуживающие внимания работы по геологии гелия в зарубежной литературе не встречались. Повидимому, убедившись в малой эффективности поисков крупных месторождений гелиеносных газов вне Северной Америки, специалисты пришли к выводу о целесообразности закупки гелия в США или добычи его попутно из гигантских газоконденсатных месторождений типа Слохтерн-Гронингем (Нидерланды), содержащих десятки миллионов кубических метров товарного гелия.

В Советском Союзе после Великой Отечественной войны гелиевая промышленность развивалась по линии как поисков высокогелиеносных газовых залежей, так и попутного извлечения гелия из крупных газовых месторождений. Достаточно полное обобщение опубликованных данных по геологии гелия в 60-х годах сделано В. П. Якуцени (1968).

Самостоятельная проблема применения гелия как индикатора при решении различных прикладных геологических задач начала развиваться в 30-х годах. Основоположником этого направления был В. Г. Хлопин, создавший методику количественных исследований газов, в частности гелия, в минералах и породах. В. П. Савченко предложил в 1933 г. использовать гелий-аргоновый коэффициент для приближенной оценки возра-

* Информативность таких карт для решения структурно-геологических задач намного ниже, чем при съемке в приповерхностном слое активного водогазообмена (Яницкий, 1974).

ста подземных вод. Несколько позже в СССР (Хлопин, Герлинг, 1957) и за рубежом (Харлей, 1956; Keevil, 1942) получили широкое развитие исследования гелия в породах и минералах при попытке определения их абсолютного возраста. В этой связи были получены важные сведения о величине потерь радиогенного гелия большей частью минералов и основными группами пород; для минералов с плотной кристаллической структурой были получены избыточные количества гелия, в отдельных случаях весьма значительные. В настоящее время способ геологического датирования с помощью гелия всеми исследователями признан малоинформативным. Однако полученные в ходе экспериментов данные очень важны для понимания вопросов геохимии и баланса гелия в недрах. Исследованиями неподвижных форм гелия, аргона и других газовых компонентов в минералах занимались С. Б. Брандт (1971—1975 гг.), К. К. Жиров (1970—1973 гг.), Л. Н. Овчинников (1971—1975 гг.) и др. Они были направлены на изучение процессов рудообразования и выявление рудоконтролирующих структур — глубинных разломов.

В самостоятельную группу можно объединить несколько работ, в которых исследовались взаимоотношения гелия и изотопов аргона для оценки интенсивности поступления гелия из литосферы в атмосферу и диссипации его в космос (Damon, Kulp, 1958; Turekian, 1959; Акасофу, Чепмен, 1974). Выполнялись также расчеты поступления гелия на Землю с метеоритной пылью (Maune, 1956).

В печати неоднократно появлялись сообщения о нахождении гелия в шахтах в связи с изучением газового режима горных выработок. Наиболее интересной из такого рода публикаций является работа шведских исследователей, (Grip, Odman, 1944), изучавших проявления гелиеносных газов на полиметаллических рудниках Болиден, Даннемор, Энаберг и на о. Эланд. Следует отметить большую ценность изложенных в ней результатов детальных исследований газовыделений по подземным горным выработкам, где отмечена пространственная корреляция газопроявлений с тектоническими нарушениями, хотя генезис гелия авторами этой работы связан с урансодержащими тухолитами. В газовыделяющих скважинах о. Эланд ими была зафиксирована максимальная для Европы концентрация гелия в свободных подземных газах — 1,2 об.%. В этой работе впервые приведены данные об аномальных концентрациях азота и гелия в северной части Балтийского моря. Аномально высокая гелиеносность этого бассейна заслуживает особого внимания.

Определенное отличие от отмеченных выше возрастных исследований имела осуществленная в 1945—1947 гг. попытка Э. К. Герлинга зафиксировать гелиевое «дыхание» Земли. На важность таких исследований В. И. Вернадский обращал внимание еще в 1933 г. Объектом исследований стал купол Мельниковского газового месторождения в Поволжье расположенный на глу-

бине около 60 м. Пробы грунтового воздуха в этих исследованиях отбирались из шпуров, пройденных по нескольким профилям над куполом; анализ газа выполнялся на приборе Хлопина — Герлинга, представляющем собой усовершенствованную модификацию прибора Ш. Муре (Герлинг, 1957 б). По-видимому, недостаточная чувствительность прибора не позволила получить на Мельниковском куполе заслуживающих внимания результатов, и подобного рода работы не были продолжены.

Возможность поисков месторождений радиоактивных руд по гелиевым аномалиям имеет связь с одной из основных гипотез гелиеобразования, изложенной Д. Ш. Роджерсом и обусловленной радиоактивным α -распадом. Позже эту же возможность неоднократно обсуждали В. И. Вернадский, В. Г. Хлопин, Мария Кюри. Последняя, в частности, весьма скептически оценивала применимость гелиевой съемки для поисков радиоактивных руд из-за наличия глубинных источников гелия, намного более продуктивных, чем залежи радиоактивных руд в приповерхностной зоне. Еще в начале столетия М. Кюри писала: «Гелий, выходящий из Земли, вероятно, образуется из лежащих на глубине радиоактивных веществ..., однако поиски радиоактивных минералов, основывающиеся на этом признаке, по-видимому, не имеют шансов на успех, так как радон, а тем более устойчивый гелий могут происходить из отдаленных подземных областей. Количество выделяющегося гелия, по-видимому, не связано с активностью источника» (Кюри, 1960).

Первые расчеты возможного аномального эффекта в связи с локальными радиоактивными источниками конечных размеров были выполнены в Радиовом институте АН СССР при оценке предложения В. К. Котульского применять гелиевую съемку для поисков радиоактивных руд (1944 г.). По свидетельству В. И. Баранова, эти расчеты показали низкие приращения концентраций над фоновым потоком гелия, на основании чего метод был признан малообнадеживающим, и за рамки теоретической оценки работы тогда не вышли.

Экспериментальную проверку возможности поисков радиоактивных руд гелиевый метод получил несколько позже в работах В. С. Глебовской, А. Г. Граммакова, И. М. Хайковича и др. (Граммаков, Глебовская, Хайкович, 1965). Анализ проб осуществлялся указанными авторами на модернизированных гелиевых течеискателях масс-спектрометрического способа измерения. Чувствительность приборов по газовой фазе достигала $5 \cdot 10^{-4}$ об.%; точность анализа при такой концентрации составляла примерно ± 20 отн.%; при содержании гелия $1 \cdot 10^{-3}$ об. % точность повышалась до ± 5 %. Однако при анализе гелия в воде чувствительность и точность исследований снижались почти на порядок за счет неизбежной предварительной дегазации воды. Полный газовый анализ выборочных проб производился объемно-химическим и хроматографическим способами.

Судя по публикациям, перечисленные авторы фиксировали на раннем этапе исследований в области распространения радиоактивных рудных тел небольшие по интенсивности аномалии гелия, параметры которых могли быть объяснены известной массой α -излучателя; позже, однако, были встречены мощные по интенсивности аномалии, природу которых пришлось связывать с глубинными источниками, без расшифровки последних (Граμμαков, Глебовская, Хайкович, 1965). Наконец, в более поздних работах тех же авторов нашли отражение мешающие прямому поисковому методу факторы — горизонтальный поток подземных вод, интенсивные восходящие по разломам потоки глубинного гелия и пр., что требовало, по мнению авторов, разработки способов «разбраковки» аномалий. Особые надежды при этом были возложены на изотопный анализ гелия* («Изотопы...», 1974), поскольку давно уже предполагалось, что аномалии, связанные с залежами радиоактивных руд, должны иметь повышенные концентрации He^4 , т. е. более тяжелый изотопный состав.

Последняя задача до сих пор остается нерешенной, причины этого рассматриваются в гл. II. Сомнительна также перспектива применения гелиевой съемки для прямых поисков месторождений нефти и газа, предложенной Н. И. Мусиченко, поскольку приповерхностная зона участка высокого нефтегазонасыщения отличается минимальной вертикальной проницаемостью (Быков, Шустер, 1972) и характеризуется фоновым полем гелия в верхней области рассеяния (Яницкий, 1974). Например, по данным В. Н. Башорина (устное сообщение), вся площадь подсоленосной залежи Оренбургского газоконденсатного месторождения характеризуется фоновым полем гелия; такая же картина получена В. М. Коробейником для площади Шебелинского газового месторождения и А. В. Дикунном для месторождений Волгоградской области.

Таким образом, идея поисков месторождений радиоактивных руд, газа и нефти по максимумам гелиевых аномалий оказалась действительно малоперспективной, что объясняется принципиально иными законами распределения концентраций гелия в верхней литосфере.

Разработка региональной гелиевой съемки была начата во Всесоюзном научно-исследовательском институте минерального сырья (ВИМС) в 1964 г. по инициативе А. Н. Еремеева. Одновременно к таким же исследованиям приступил В. Н. Башорин, работавший на Урале и в Тургайском прогибе (Башорин, 1976). До 1967 г. решались методические вопросы — способы отбора проб, их анализа, построения карт. Основной объем исследований был направлен на изучение водной фазы; анализ гелия в ней

проводился на новых приборах мембранного типа конструкции Л. Е. Левиной, В. В. Пименова, В. Е. Стадника («Магниторазрядный...», 1973; «Измерительная...», 1975). Применение новой аппаратуры исключило необходимость предварительной дегазации воды, что позволило постепенно повысить чувствительность и точность исследований.

В 1967—1969 гг. основной объем водногелиевой съемки выполнялся на территории Северного Казахстана, Тургайского прогиба и Урала. Для Северного Казахстана было построено до 10 вариантов схем распределения концентраций гелия в подземных водах для всего региона и несколько фрагментов более крупного масштаба по участкам детальных работ в отдельных его частях. Интерпретация проводилась путем сопоставления схем распределения гелия с различными геологическими и геофизическими картами.

Позже исследования проводились в других районах Советского Союза. Они носили как рекогносцировочный, так и детальный характер и выполнялись с целью структурно-геологического картирования, а также косвенного прогноза эндогенного оруденения. Число организаций — исполнителей гелиевой съемки значительно расширилось. В нескольких районах СССР, в том числе в зонах вечной мерзлоты, комплексная газовая съемка выполнялась группой НИС МГРИ (Фридман, 1970); в Забайкалье региональные и рекогносцировочные исследования проведены В. И. Флешлером.

В 1970—1972 гг. установлена высокая информативность гелия для изучения миграции вод в гидросфере (Виндюков и др., 1974), что привлекло новую группу участников работ — гидрогеологов, работников санэпидемслужбы Минздрава СССР.

Широкий фронт выполненных работ позволил приступить к обобщению материалов и составлению карт для различных районов.

Благодаря перечисленным исследованиям главные черты распределения потока гелия достаточно хорошо изучены и есть основа для создания карты поля гелия всей территории Советского Союза. Такая карта имеет многоцелевое назначение. Уточнены также возможности комплексной газовой съемки в зоне аэрации и в подземных водах. В этот комплекс в зависимости от конкретной геологической обстановки могут входить различные компоненты — от водорода и гелия до наиболее тяжелой — паробразной ртути. Эти направления работ развиваются многочисленными исследователями.

* Природный гелий состоит из двух изотопов. Легкий изотоп He^3 является продуктом ядерных реакций, тяжелый изотоп He^4 образуется при α -распаде радиоактивного вещества.

В данной главе освещены условия накопления гелия в недрах на основании опубликованных сведений и результатов гелиевой съемки, что позволяет получить общее представление о механизме газового «дыхания» Земли. Выводы исследований справедливы, очевидно, только для самой верхней, изученной части земной коры (первые 3—5 км), где еще сохраняются небольшие температуры и давления. В области высоких температур и давлений химическая физика гелия представляется весьма проблематичной. Возможны существенные отклонения от привычных нам норм поведения газов, в том числе и гелия, что установлено в вулканических районах, где характерны плазмированные формы флюидов (Яницкий, Пименов, 1976). Очевидна также важная роль газов в процессах глубинного тепло- и массопереноса, породо- и минералообразования, о чем писали В. И. Вернадский, С. С. Смирнов и др.

Определяющие газовый режим верхнего слоя коры процессы в недрах Земли остаются пока для нас неизвестными, в то время как они охватывают более 99% объема нашей планеты. Поэтому, рассматривая «нормальные» условия распределения гелия, распространенные по существу в ничтожно малом по мощности верхнем слое Земли, следует иметь в виду относительный характер наших суждений. Это все же правильнее, чем распространять наблюдаемые в приповерхностной зоне концентрации и изотопные отношения гелия на нижнюю часть коры или даже на мантию.

1. ОБРАЗОВАНИЕ ГЕЛИЯ ПРИ РАДИОАКТИВНОМ α -РАСПАДЕ

До недавнего времени образование атома гелия из α -частицы представлялось одностадийным. А. В. Карякин (1962) показал, однако, что процесс нейтрализации α -частицы при ее торможении происходит не мгновенно: как правило, при пробеге она захватывает только первый электрон, и в кристаллическом или метамиктном веществе образуется положительно заряженный ион атома гелия, имеющий большой радиус и до своей нейтрализации практически не способный к миграции.

Нейтрализация ионов зависит от электронной проводимости среды — быстрее она происходит в метамиктных и радиоактивных минералах и за более длительные промежутки времени в минералах с плотной кристаллической структурой.

Альфа-распад и образование заряженных центров вызывают закалку вещества, которая может быть снята сильным прогревом, увеличивающим концентрацию свободных электронов. Этот процесс называется отжигом. Он происходит и под действием частиц большой энергии, в том числе самих α -частиц. Таким образом, при α -излучении идут два противоположно направленных процесса — отжиг и образование новых ионных центров. При этом возникновение нейтральных атомов гелия нельзя отождествлять с началом его миграции, правильнее считать, что возникает возможность движения — тенденция к движению, которую гелий может реализовать не всегда.

2. МИГРАЦИОННЫЕ ФОРМЫ ГЕЛИЯ

В верхней части литосферы гелий может находиться в трех различных по миграционной способности формах: а) твердорастворенной, представленной ионами He^+ или α -частицами, захвачившими в точке торможения по одному электрону; б) атомарной окклюзированной, включающей нейтральные атомы, находящиеся в кристаллической решетке или в закрытых порах минералов и пород; в) атомарной свободной, включающей нейтральные атомы, не связанные с внутренней структурой вещества и находящиеся с фазой-носителем в раскрытых трещинах или сообщающихся порах.

Первые две формы гелия являются неподвижными; они достаточно хорошо изучены в период 40—60-х годов при разработке гелиевого метода определения абсолютного возраста геологических формаций. Важнейшим результатом этих исследований является оценка сохранности гелия в породах и минералах. Постановка эксперимента базировалась на газе, прочно связанном с внутренней структурой минералов (Герлинг, 1957). В опыте породы или минералы, хранившиеся на открытом воздухе, дробились в вакуумной мельнице (до 100—200 меш), вакуумный экстракт отбрасывался или анализировался отдельно, а порошок спекался при температуре до 1500°C. В полученной при плавлении порошка газовой фазе определялось количество гелия, относимое к единице массы минерала.

Установленное количество гелия сопоставлялось с расчетной его продукцией, зависящей от находящегося в образце α -излучающего радиоактивного вещества и времени — абсолютного возраста данной формации. Оцененный по разности средний уровень потерь гелия из пород составлял: для гранитов — 60—90% (независимо от глубины отбора проб); для сильно радиоактивных минералов — 40—99%; для акцессорных минералов — от 0 до 50%.

В некоторых минералах (бериллах, магнетите, сфене, касситерите и др.) количество гелия могло иногда весьма значительно превосходить возможную его продукцию за все время распада

имевшегося в образце радиоактивного вещества. Для объяснения этого эффекта было высказано несколько предположений, в частности, о высокой концентрации гелия в исходных минералообразующих флюидах магматического расплава. Захваченный (импрегнированный*) таким образом в минерал гелий сохранился, возможно, в первоначальной концентрации за счет плотной кристаллической упаковки.

Дальнейшие исследования неподвижных форм гелия развивались по нескольким направлениям. В качестве индикатора абсолютного возраста стал использоваться более надежный радиогенный аргон (калий-аргоновый метод), и гелий в этом случае анализировался параллельно для определения минимально возможного возраста. Кроме полученной при плавлении порошка компоненты анализировался также извлеченный при дроблении газ, находившийся в нарушениях (дефектах) решетки и в газожидких микровключениях.

В последние годы изучение выделенной из образца газовой компоненты приобрело комплексный характер — анализировались все основные компоненты газа и некоторые изотопы. Результаты исследований показали широкую распространенность гелия в нерадиоактивных рудах (колчеданных, полиметаллических, титаномagnetитовых) и в жильных минералах; гелий ассоциировался с азотом, метаном, углекислым газом и водородом как в рудах, так и в первичных геохимических ореолах, захватывающих все типы вмещающих пород. Весь извлеченный из образцов газ, за исключением части радиогенного аргона и гелия, перечисленные выше исследователи считают сингенетичным породам (интрузиям, жильным минералам) или рудам, т. е. относят по генезису к периоду рудогенеза. Эти авторы подчеркивают, что высокие концентрации гелия и аргона всегда характерны для гидротермально проработанных зон и контактов.

Третья форма гелия является подвижной. Как отмечено в гл. I, геология гелия началась с изучения потоков свободных газов-носителей подвижного гелия. Исследовались разнообразные проявления газов в родниках, шахтах, выделениях скважин, вулканов и пр. Длительное время такие работы имели эпизодический характер. Только в 50-х годах они стали развиваться планомерно в области нефтегазовой и рудной геологии. В последнем случае установлено широкое распространение гелия, азота, паробразной ртути в современных восходящих потоках рассеяния, мигрирующих по зонам повышенной проницаемости — разломам раскрытого типа (Еремеев, Ершов, Яницкий, 1971; Фридман, 1970 и др.).

Комплексные исследования неподвижных и подвижной форм гелия до последнего времени не проводились. Такая задача пред-

ставляет определенные технические и организационные трудности. Некоторые сведения о столь важных для понимания гелиевой проблемы отношениях его форм можно получить при сопоставлении результатов водной и керновой гелиевых съемок с изучением газа, выделенного из дробленных в вакууме образцов. Такие сопоставления показывают значительный избыток подвижного гелия (подробнее рассматривается в разделе 5 данной главы). Объяснить это можно тем, что переход неподвижных форм газа в подвижную происходит на глубине, расположенной значительно ниже области исследований. Обратим внимание в этой связи на механизм миграции газов (гелия в частности) в природной многокомпонентной среде, который определяет распределение гелия в исследуемом приповерхностном слое.

3. ДИФфуЗИОННАЯ МИГРАЦИЯ

Под диффузией понимается процесс переноса одного вещества в среде другого, происходящий на атомно-молекулярном (корпускулярном) уровне и обусловленный тепловым движением. Кинетика диффузии подобна кинетике теплового и электрического потока; интенсивность диффузии D в случае одномерного движения определяется первым законом Фика

$$Qx = -D \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (1)$$

где Qx — диффузионный поток, характеризующий количество вещества, переносимого через единицу поверхности за единицу времени;

c — концентрация вещества.

Как следует из уравнения (1), поток исчезает в случае однородности системы, т. е. когда

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0.$$

Условия диффузионного массообмена в недрах относятся к весьма сложным: обычно диффузия здесь происходит совместно с конвекцией и фильтрацией. Поэтому во многих работах рассмотрены уравнения конвективной или фильтрационной диффузии. Поскольку нас пока интересует раздельная оценка доли каждого из механизмов миграции гелия, укажем факторы, непосредственно влияющие на его диффузию. Отметим также необходимость точной системы отсчета, более простой в случае движения в твердом теле и усложняющейся в флюидах, которые сами по себе подвижны и крайне чувствительны к перепадам температур и давлений. Например, для экспериментальных оценок диффузии газа в воде ее приходится закреплять желатином, без чего диффузия превращается в конвективную диффузию с более интен-

* Впоследствии термин «импрегнированный» заменен некоторыми авторами на «окклюдированный».

сивными параметрами переноса. Рассмотрим наиболее простой случай — диффузию в однородном твердом теле.

В экспериментах с метаном П. Л. Антонов показал, что при величине пор глинистых образцов, соизмеримых с размерами молекул газа, начальные параметры диффузии отличаются от установившихся (стационарных). При этом первые заметно выше последних, что П. Л. Антонов объяснял эффектом закупорки пор. Этот процесс, называемый сорбцией, имеет, однако, более сложную природу химического взаимодействия веществ на уровне ковалентных (ближних) связей.

Химически нейтральный гелий проникает через некоторые вещества, например через кварцевое стекло, достаточно свободно. При миграции такого гелия через другие минералы возникают те или иные «задержки», также обусловленные весьма сильными ближними связями, преодолеть которые можно только созданием градиента давления или температуры. Наконец, известны минералы, способные удерживать в себе значительные концентрации гелия на протяжении геологического времени; эти же минералы не пропускают гелий, т. е. через них в нормальных условиях диффузионной миграции не происходит.

Большой вклад в изучение отмеченного процесса внес Э. К. Герлинг (1957а). Он экспериментально показал, что выход гелия из минералов определяется величиной теплоты диффузии, зависящей от структуры и плотности кристаллической решетки: минералы с плотной упаковкой и ненарушенной структурой, имеющие теплоту диффузии более $1,43 \cdot 10^5$ Дж/моль, практически не выделяют и не пропускают гелий. К таким минералам относятся берилл, магнетит, сфен и многие другие.

В сильно радиоактивных минералах (торианите, урановой смолке и др.) исходная кристаллическая структура обеспечивает высокую сохранность гелия. Только со временем, под действием разрушающего излучения, в структуре минералов появляются дефекты («просветы», по Э. К. Герлингу), и начинается усиленная утечка накопившегося ранее газа. Этот механизм объясняет причину более высоких потерь гелия сильно радиоактивными минералами, уровень которых со временем достигает 99%.

Дальнейшие исследования позволили выявить единый механизм выхода инертных газов (гелия, аргона, криптона, ксенона) из минералов и пород. Интенсивность выхода, пропорциональная в первом приближении температуре отжига, оказалась неравномерной — на кривой выхода наблюдались характерные максимумы. Они объяснялись наличием связей атомов инертных газов с вмещающим веществом; для преодоления таких связей (или «барьеров») необходимо затратить дополнительную энергию, получившую название «энергии активации» (Морозова, Ашкинадзе, 1971). И. М. Морозова и Г. Ш. Ашкинадзе сделали следующий вывод (с. 114): «Кинетика выделения He, Ar, Kr, Xe из минералов не подчиняется классическим уравнениям диффузии

и удовлетворительно описывается уравнением химической реакции первого порядка... Сложный характер кинетических кривых объясняется существованием спектров энергий активации отжига атомов редких газов по аналогии с выявленными в физике твердого тела спектрами энергий активации отжига дефектов, образованных в кристаллах под действием корпускулярного или электромагнитного облучения».

Итак, с позиции физической химии под диффузией понимается процесс миграции какого-либо компонента, зависящий от характеристик вмещающей среды и приложенной энергии. От конвекции и фильтрации диффузия отличается только тем, что движение вещества происходит через сплошную среду на атомно-молекулярном уровне, в то время как при конвекции и фильтрации движение осуществляется по нарушениям сплошности среды (сообщающимся порам и трещинам) в виде суммарного потока всех способных к перемещению компонентов.

Разумеется, резкой границы в характеристиках среды и происходящей через нее миграции вещества провести нельзя, поскольку между микроструктурой и макротрещинами существует плавный переход, обусловленный наличием микротрещин. Поэтому цифровые значения процесса охватывают большой диапазон и требуются условные разграничения. Уточним с этих позиций фактические скорости диффузии гелия в реальных термодинамических условиях верхней гидро-литосферы, где выполняются основные виды гелиометрических исследований (глубина — первые сотни метров, давление обычно соответствует гидростатическому, температура — до 20°C). Экспериментально установленные параметры диффузии для таких условий в воде и основных типах пород приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры диффузии гелия для некоторых сред

Среда	Коэффициент диффузии гелия, см ² /с	Источник сведений*
Вода	$3 \cdot 10^{-5}$	1, 2
Увлажненный суглинок	$10^{-4} - 10^{-2}$	3
Насыщенная водой глина	$5 \cdot 10^{-5}$	2
Плотный глинистый сланец	10^{-6}	2, 4
Гранитоиды	$10^{-8} - 10^{-10}$	2, 4

* 1 — В. А. Соколов (1956); 2 — Р. Ньютон, Г. Ф. Роунд (1961 г.); 3 — Ю. Л. Булашевич, В. Н. Башорин (1976); 4 — А. И. Тугаринов, Ю. Г. Осипов (1977).

Согласно расчетам Р. Ньютона и Г. Ф. Роунда скорость перемещения диффузионного фронта гелия в донных илах составляет доли миллиметра в год. Отсюда ими сделан вывод об отставании диффузии гелия от скорости осадконакопления на дне Мирового океана.

По данным А. Г. Граммакова, В. С. Глебовской и И. М. Хайковича (1965), 1 км пути диффузионный фронт гелия в континентальных условиях проходит примерно за 1,5 млрд. лет. На этом основании авторами высказано мнение об отсутствии мигрирующего таким способом подкорового гелия в приповерхностном слое, вследствие чего он не может мешать поискам месторождений радиоактивных руд по связанным с ними локальным гелиевым аномалиям.

В последнем случае высказана крайняя точка зрения, которой А. Г. Граммаков с соавторами стремились обосновать связь встречаемых в приповерхностном слое гелиевых аномалий с залежами радиоактивных руд; для такой связи необходимо отсутствие активных проявлений источников глубинного гелия. Тем не менее эта оценка близка к истине. Для обоих приведенных расчетов авторы принимали достаточно высокие значения $K_{\text{дифф}}$ гелия (порядка $5 \cdot 10^{-5}$ см²/с), близкие таковым в воде и водонасыщенных глинах. Если же взять $K_{\text{дифф}}$ равным 10^{-7} см²/с, что больше соответствует среднему уровню проницаемости литосферы, то становится очевидным явное несоответствие теоретически возможного и реально наблюдаемого поля гелия в приповерхностном слое, где характерен активный водогазообмен (Яницкий, Пименов, 1976). Моделирование показывает, что в таких условиях при наличии одного лишь диффузионного питания в верхней части литосферы может быть только равномерное распределение гелия, подобное тому, которое наблюдается в атмосфере.

4. КОНВЕКТИВНО-ФИЛЬТРАЦИОННАЯ МИГРАЦИЯ

В соответствии с приведенным выше определением конвекция и фильтрация начинаются при наличии термодинамического напора в условиях нарушения сплошности (или устойчивости) среды. Движение осуществляется в форме массивованного потока фазы-носителя, захватывающего в окружающем пространстве все способные к перемещению компоненты. Например, в жильно-трещинных подземных системах потоки воды могут нести не только суспензию, но и твердые частицы. Поэтому в отличие от диффузии направление движения массопотока здесь задается фазой-носителем; распределение концентраций остальных вовлеченных в поток компонентов самостоятельной роли не играет; перенос микрокомпонентов идет независимо от градиента концентрации, даже может быть направлен против него, на чем основаны применяемые в технике способы термодинамического обогащения. Эти формы массопереноса в недрах можно назвать принудительными, или активными.

Активные формы миграции газов, в частности гелия, исследованы в меньшей мере, чем диффузия. К числу наиболее значи-

мых можно отнести работу В. А. Соколова (1956), детально рассмотревшего механизм фильтрации газа с подвижной жидкостью, включающий и «пробулькивание» пузырьков газовой фазы. В таких условиях гелий получает значительную подвижность и переносится фазой-носителем по проницаемым структурам на значительные расстояния. Скорость переноса в этом случае на несколько порядков выше диффузионной даже в «застойных» водах глубоко залегающих частей артезианских бассейнов (Яницкий, 1974).

Важные исследования физико-химических процессов фильтрации выполнены в последние годы В. С. Голубевым с соавторами (1970); они позволили количественно оценить сорбционные эффекты в гетерогенных системах. Инертный в нормальных термодинамических условиях гелий в меньшей мере подвержен действию сорбции. Однако и для него такой процесс проявляется достаточно отчетливо. Многокомпонентная подземная среда (породы, вода, углеводороды), через которую движется по зонам повышенной проницаемости фильтрационный поток, ассимилирует восходящий из недр гелий пропорционально растворимости. В нефти, например, растворимость гелия по сравнению в воде увеличивается примерно в 10 раз, а в свободной газовой фазе (азот, углеводороды, углекислый газ) гелия уже в 100 раз больше, чем в контактирующей воде. Такие природные накопители (аккумуляторы, или ловушки) существенно задерживают направленную миграцию гелия из недр к поверхности: в них упругость гелия стремится к значениям, равновесным потоку*.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что во всем доступном для прямых исследований слое верхней части литосферы (3—5 км) отсутствуют участки «повешенных» концентраций гелия, т. е. те случаи кажущейся аномальной концентрации в верхних горизонтах, о которых писали исследователи на ранних этапах развития геологии гелия. Упругость гелия с глубиной во всех фазах постоянно (равномерно или ступенчато) возрастает, что подтверждает квазистационарный характер восходящих фильтрационных потоков.

На рис. 2 показаны основные типы фактически наблюдаемых при вертикальном зондировании концентрационных профилей гелия. Они свидетельствуют об однонаправленном процессе фильтрации гелия из недр к поверхности под избыточным давлением с абсолютным преобладанием скоростей фильтрации над диффузией. Вторая переменная миграции гелия обусловлена возрастающей снизу вверх составляющей горизонтального рассеяния (фактором приповерхностного водогазообмена), которая минимальна в породах кристаллического субстрата и максимальна

* Упругость наиболее точно отражает интенсивность гелиенасыщения недр в данных термодинамических условиях. Не же упругость для гелия отождествляется с его полной концентрацией.

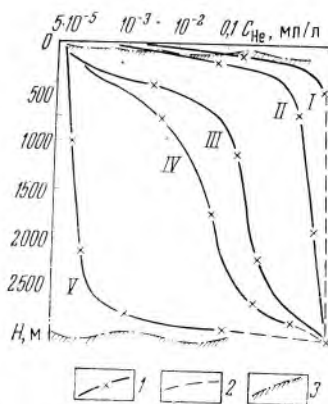


Рис. 2. Вертикальные концентрационные профили гелия, формирующиеся в различных гидродинамических условиях геосферы из тождественного по интенсивности и местоположению очага разгрузки, залегающего на глубине более 3 км.

Кривые изменения концентраций гелия с глубиной: I — для выхода на поверхность кристаллического субстрата в зоне активного разлома (высокий вертикальный градиент концентрации имеет место только в приповерхностной части интенсивного водогазообмена); II — для осадочной толщи мощностью 3 км, залегающей на кристаллическом субстрате и нарушенной сквозным активным разломом (из-за отсутствия сплошности пластов высокий вертикальный градиент проявлен только в приповерхностной зоне интенсивного водогазообмена); III — то же, но в условиях сохранения сплошности экранов осадочной толщи (условия образования anomalно высокого пластового давления); IV — то же, но в условиях интенсивного бокового потока подземных вод, например в предгорных частях осадочных бассейнов; V — для открытых (морских) бассейнов с гелиенирующими разломами на дне. 1 — наблюдаемая часть концентрационного профиля с точками отбора проб; 2 — интерполированная часть профиля; 3 — положение кристаллического субстрата: верхняя линия для кривой I, нижняя — для кривых II-V.

в осадочных бассейнах; в открытых водоемах, так же как в атмосфере, господствует конвективное перемешивание.

В табл. 2 приведены для сравнения основные показатели миграции рассмотренных форм гелия для термодинамических условий верхней части литосферы; их значения заимствованы из работ Р. Ньютона, Г. Ф. Роунда (1961); А. Г. Граммакова, В. С. Глебовской и И. М. Хайковича (1965); В. С. Голубева, Ю. Г. Осипова и И. Н. Яницкого (1970); В. С. Голубева, А. Н. Еремеева и И. Н. Яницкого (1974). Сравнение цифр показывает, что реальное значение для исследуемой зоны имеют только активные формы переноса гелия.

Таблица 2

Параметры миграции различных по подвижности форм гелия

Миграционная форма гелия	Скорость перемещения фронта миграции, м/год	Время, потребное для прохождения фронтом пути в 1 км, лет
Неподвижная	0	∞
Диффузионная	$< 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^9 - 10^4$
Фильтрационная	$> 0,1$	

Благодаря наличию восходящих фильтрационных потоков в приповерхностном слое интенсивного водогазообмена отмечается высококонтрастное поле гелия с перепадом концентраций в пределах четырех-пяти порядков. При этом смещения гелиевых аномалий в направлении известного горизонтального стока подземных вод практически не наблюдается, хотя скорости последнего на исследованных объектах по фактическим оценкам состав-

ляют сантиметры в год. Отсюда предполагаемая скорость восходящего потока гелиеносного флюида в центральных частях аномальных зон должна быть не менее 10 см в год. Эти цифры согласуются с величинами, полученными В. С. Голубевым и др. (1970) при аналитических оценках реально наблюдаемых вертикальных концентрационных профилей в различных геологических условиях.

5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕЛИЯ РАЗНЫХ ФОРМ В ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

Выполненные гелиеметрические исследования показали определенное соответствие концентраций подвижного гелия во всех средах (газе, воде, породе): на участке с низкой гелиенасыщенностью в воде отмечается низкая концентрация гелия в остальных двух фазах; высокое гелиенасыщение в одной фазе подтверждается близкими значениями в двух остальных (Егемеев, Solovov, Yanitsky, 1972).

Особый интерес в этой связи вызывает сопоставление по природным объектам локальных концентраций гелия различных миграционных форм. К сожалению, такие характеристики в опубликованных материалах отсутствуют. В качестве единственного примера можно привести данные ранних экспериментов автора (1960—1965 гг.), выполненных совместно с А. И. Фридманом с целью оценки времени свободного выделения гелия из каменных проб (см. гл. III, раздел 3).

Образцы пород отбирались из действующих забоев горных выработок сразу после отпалки и сразу же из поднятых на по-

Таблица 3

Сопоставление концентраций неподвижного и подвижного гелия в образцах (по данным И. Н. Яницкого, А. И. Фридмана)

Образец	Глубина отбора пробы, м	Концентрация гелия, см ³ /г	
		Неподвижная форма	Подвижная форма
Граниты из массива	100	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
» из зоны разлома	67	$8,7 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Гранодиориты из массива	224	$8,6 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$
» из зоны разлома	280	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Туфогенные породы из массива	212	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Туфогенные породы из зоны разлома	420	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Пирит золотоносный из рудного штоковерка	390	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,82 \cdot 10^{-3}$
Настуран из рудного штоковерка	182	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$

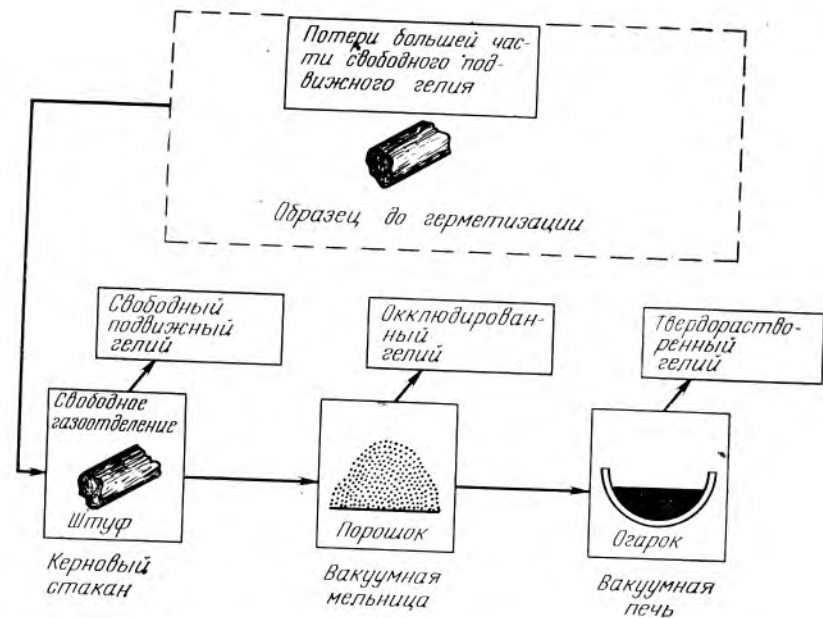


Рис. 3. Схема последовательной обработки образца (керна, штуфа). Показаны миграционные формы выделяющегося при обработке гелия

верхность буровых снарядов. Очевидно, что после завершения цикла свободного истечения гелия из образца в нем оставался только прочно удерживаемый газ (окклюдированный и твердорастворенный), который можно объединить в неподвижную форму. Как известно, извлечение последнего возможно только при измельчении и плавлении образца.

Схема последовательной обработки породы показана на рис. 3; в табл. 3 приведены полученные таким путем концентрации гелия подвижной и неподвижной форм. Весьма неожиданным для исполнителей оказались близкие величины концентраций гелия указанных форм, независимо от радиоактивности пород. На этом основании в дополнение к выводу о контрастном распределении подвижного гелия в верхней зоне гидrolитосферы можно отметить признаки равновесия концентраций неподвижного гелия, которого явно больше там, где интенсивнее поток (или упругость) подвижного гелия.

В этой связи особый интерес представляют эксперименты (Карпинская, Шанин и Борисевич, 1965) с целью исследования кинематики насыщения минералов инертными газами в автоклавах. Оказалось, что при повышенном давлении и температуре минералы насыщаются газами до равновесного состояния. После снижения давления и температуры они теряют некоторое количество газа, а остаток становится пропорциональным плот-

ности упаковки образца. Последующая температурная обработка дает кривые выходы газа, близкие к тем, которые получаются при отжиге естественных образцов. Детали различия кривых (Ю. А. Шуколюков и Л. К. Левский, 1972) можно объяснить более сложным и многостадийным процессом изменения режима газонасыщения и дегазации вещества в природных условиях.

С учетом рассмотренных в разделе 3 данных И. М. Морозовой, Г. Ш. Ашкинадзе и эксперимента Л. Л. Шанина, можно сделать вывод о соответствии исходного уровня гелиенасыщения минералов и пород в недрах тем значениям упругости, которые имели место в естественных термодинамических условиях их образования. При последующем понижении температуры и давления происходили потери гелия из твердой фазы и возникали благоприятные условия для образования потока — избыток гелия сбрасывался. Такой процесс, очевидно, может происходить за счет обычной денудации поверхности, но особенно сильно при восходящих движениях мегаблоков земной коры. Этим, в частности, можно объяснить наиболее интенсивные потоки гелия по разломам на участках длительного поднятия коры (щиты, антиклизы, плато), что достаточно четко проявлено на всех континентах.

Приведенные факты свидетельствуют о наличии взаимосвязи между всеми формами гелия в недрах и о сложном, динамическом характере формирования его потока.

6. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ БАЛАНСОВЫХ РАСЧЕТОВ

Оценка интенсивности потока гелия через континентальную и океаническую кору, так же как последующих потерь в космос, представляет особый интерес в связи с решением ряда задач, среди которых на первом месте стоит расчет тепломассообмена планеты. Интенсивность потоков и общий баланс гелия оценивались многими авторами, однако полученные ими значения имеют серьезные расхождения, что объясняется сложностью проблемы и неясностью отправных положений. Для иллюстрации можно привести два примера явно ошибочных расчетов.

В работе К. И. Майна (Maune, 1956) описывается баланс гелия в связи с поступлением из космоса метеоритной пыли. Вертикальные концентрационные профили гелия не позволяют допускать такой возможности, поскольку здесь имеет место однонаправленный поток противоположного вектора — из недр в космос (Яницкий, 1974).

П. М. Харлей (1956) сделал попытку определить плотность диффузионного потока по гранитному массиву, используя образцы, отобранные на глубине 1 км при проходке тоннеля Адамс. Эксперимент базировался на изучении только неподвиж-

ного гелия: образцы гранита извлекались из массива без герметизации, хранились и дробились на открытом воздухе, что приводило к потере всего подвижного и большей части окклюдированного гелия; расчет потока строился по твердорастворенному и части окклюдированного гелия без учета реальной проницаемости массива. В результате получились искажения, соответствующие потерям гелия из образца: плотность диффузионного потока была оценена равной $10 \text{ см}^3/\text{год}$ на 1 м^2 массива, что на пять-шесть порядков выше реально наблюдаемого. Очевидно, что подобные искажения будут получаться всякий раз, когда расчет строится без учета отмеченной связи всех форм гелия.

Основные элементы баланса гелия на Земле рассмотрены в работе В. П. Якуцени (1968). Из нее следует, что оценка потока

и баланса велась по двум направлениям: а) по расчету α -продуцирования гелия в недрах; б) путем подбора скорости диссипации гелия из атмосферы в космос. Так, по Р. Е. Дамону и Д. Л. Калпу, результирующая величина диссипации составляет $7,3 \cdot 10^{30}$ атомов гелия в год; по данным К. Турекьяна, $8,66 \cdot 10^{31}$ атомов в год, или $0,006 \text{ см}^3/\text{год}$ с 1 м^2 общей поверхности Земли, включая и океаническую. Последняя цифра примерно в 1700 раз ниже величины, полученной П. М. Харлеем для поверхности гранитного массива.

Исходя из указанной величины диссипации, а также данных продуцирования в геосферах Земли (с учетом хондритовой модели распределения радиоактивных элементов), В. П. Якуцени приводит баланс, согласно которому в Земле ежегодно образуется $2,94 \cdot 10^{13} \text{ см}^3$ гелия и теряется при диссипации $0,32 \cdot 10^{13} \text{ см}^3/\text{год}$ (табл. 4). С учетом того, что генерация гелия Землей была в 2,5—3,5 раза выше, чем в настоящее время (в соответствии с периодом полураспада урана и тория), В. П. Якуцени рассчитала, что объем накопления за 4,5 млрд. лет равен $15,7 \cdot 10^{22} \text{ см}^3$, или $1,45 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$ гелия в 1 см^3 общего объема Земли: при средней плотности планеты $5,52 \text{ г/см}^3$ эта концентрация составляет $2,76 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$, или $4,93 \cdot 10^{-9} \text{ г/г}$.

В. П. Якуцени отмечает соответствие результатов своего расчета с данными К. Ранкама. При этом следует обратить внимание на сделанный вывод о полной потере Землей первозданного гелия, что произошло на раннем этапе ее развития — аккреции из протопланетного вещества. В более поздних работах («Изотопы...», 1971) В. П. Якуцени придерживается мнения о наличии в мантии Земли первозданного гелия легкого изотопного состава, фиксируемого в вулканических и тектонически активных областях. Очевидно, что при наличии в недрах Земли первозданного гелия интенсивность его потока и распределение концентраций по геосферам должны существенно измениться. Отмеченные противоречия без объяснения причин изменения точки зрения автора ставят под сомнение обоснованность вышеприведенного баланса.

Ориентиром для выполнявшихся балансовых расчетов являлись оценки температуры экзосферы с подбором соответствующих им скоростей образования и утечки изотопа ^3He : наиболее соответствующей, по мнению П. Е. Дамона и И. Л. Калпа, температурой является 1880 К. В этом случае полупериод выделения ^4He составляет $5 \cdot 10^7$ лет. Однако по более поздним оценкам С. И. Акасофу и С. Чепмена (1974) температурные характеристики экзосферы могут быть увеличены, что существенно корректирует скорость диссипации гелия. Этот сложный вопрос, вероятно, будет решен на основе фактических данных гелиевой съемки, разрешающая способность которой достигла необходимого высокого уровня.

Таблица 4

Гелиевый баланс Земли (по В. П. Якуцени, 1968)

Элементы баланса	Основные составляющие элементов баланса	Гелий, $\text{см}^3/\text{год}$
Первичный (Неперв)	Первозданный гелий, захваченный веществом Земли при формировании ее как планеты, а также первичный гелий, присутствующий в частицах протопланетного вещества Земли, из которых она сформировалась	Полностью утрачен в начальную стадию существования Земли
Радиогенный (Нерад)	Гелий, образующийся на α -распаде радиоактивных элементов в недрах Земли	$+2,94 \cdot 10^{13}$
	Гелий, образующийся при различных ядерных реакциях в недрах (нейтронное расщепление лития и т. п.)	$+5,88 \cdot 10^8$
	Гелий, образующийся в результате распада трития	$+1,15 \cdot 10^7$
Космический (Некосм)	Гелий, поступающий на Землю с метеоритной пылью и различными космическими телами	$+2,74 \cdot 10^8$
	Гелий, поступающий в атмосферу Земли с первичными космическими лучами	$+7,07 \cdot 10^4$
	Гелий, образующийся в атмосфере при вторичном космическом облучении	$+1,03 \cdot 10^4$
Диссипационный (Недис)	Гелий, диссипировавший в космос из экзосферы	$-0,32 \cdot 10^{13}$
Итого		$+2,62 \cdot 10^{13}$

7. ОЦЕНКА МАСШТАБОВ ГЕЛИЕНИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СУБСТРАТА

О масштабах гелиенирования кристаллического субстрата существуют различные представления. К числу авторов, высказывающих крайнюю точку зрения — о полном отсутствии в континентальной осадочной толще транзитного гелия, — относится, например, Л. К. Гуцало (1965 и др.). По его мнению, весь гелий в газах, водах и породах образуется из радиоактивного вещества этих же пород и вод, т. е. он сингенетичен вмещающей среде, так же как воды являются первично седиментогенными и абсолютно застойными. Разумеется, что составляющая гелия из кристаллического субстрата в данном случае равна нулю.

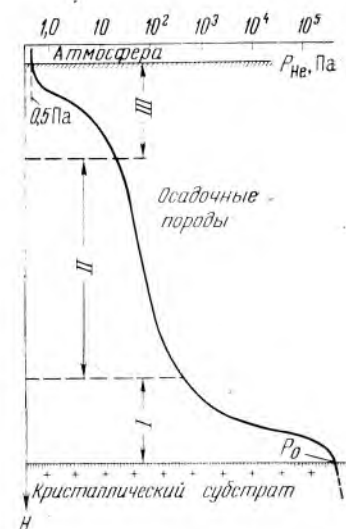
Другая группа авторов допускает частичную миграцию гелия из кристаллического субстрата в осадочную толщу (Петровская, 1972). Однако поскольку механизм проникновения гелия в этом случае авторами принимается чисто диффузионным, а воды — седиментогенными и неподвижными, то дальность такой миграции невелика. По мнению указанных исследователей, она составляет первые сотни метров от нижележащего фундамента в соответствии с оценкой диффузии, приведенной Р. Ньютоном и Г. Ф. Роундом.

Общее распределение гелия по вертикали в осадочной толще показано на рис. 4. Максимум градиента концентрации (участок I) приурочен к базальным слоям осадочной толщи, залегающим на кристаллическом субстрате. Этот максимум отражает, по мнению Н. Л. Петровской, зону проникновения гелия из кристаллического субстрата. Так этим автором объясняется природа повсеместно наблюдаемого «коэффициента положения» гелиенасыщенного пласта, впервые отмеченного Б. Хитчоном. В средней и верхней частях осадочной толщи (по концепции Н. Л. Петровской) составляющая глубинного гелия ничтожно мала. По нашим данным (Голубев, Еремеев, Яницкий, 1974), показанное на рис. 4 вертикальное распределение гелия обусловлено фактором рассеяния восходящего из недр фильтрационного потока, где в базальных слоях осадочной толщи начинает действовать горизонтальный (пластовый) водообмен.

В рассматриваемом случае ряд авторов принимают систему осадочного бассейна за неподвижную со времени ее образования, не учитывая мощный фактор геодинамики. Постоянные разнонаправленные движения отдельных блоков фундамента приводят как к изменению фаций и мощности слоев осадочной толщи (Кузнецов, 1973), так и к колебаниям наклона целых осадочных бассейнов (Вагин, Гаврилов, 1972). В таких условиях артезианские воды не могут быть неподвижными и первично седиментогенными. Происходившие, например, в течение всего фанерозоя вертикальные блоковые движения субстрата Русской платформы

Рис. 4. Основные элементы строения вертикального концентрационного профиля гелия в мощной осадочной толще, залегающей на кристаллическом субстрате

I—III — соответственно нижняя, средняя и верхняя части осадочной толщи. P_0 — исходная (максимальная) упругость гелия в исследуемом квазистационарном восходящем потоке. Первый снизу максимум вертикального градиента концентрации (I) обусловлен появлением в базальных слоях горизонтальной составляющей потока подземных вод; в верхней зоне активного водогазообмена (III) происходит выравнивание концентраций до значений, известных для атмосферного воздуха



стимулировали внутри- и межпластовые перетоки подземных вод. Первые из них легко осуществляются по проницаемым пластам-коллекторам, вторые — по гидрогеологическим окнам фациально-литологической и тектонической природы. Сложные вертикальные движения привели за геологическое время к многократной полной смене объема воды, занимающей сообщающееся трещинно-поровое пространство.

Анализ взаимосвязи сложной системы гелий — вода — вмещающая порода позволяет дать количественный расчет реально наблюдаемых упругостей гелия в осадочной толще. Такой расчет нетрудно выполнить, зная среднюю радиоактивность пород и их возраст. Из рис. 4 следует, что в верхней, сильно промытой части осадочной толщи (участок III) имеет место интенсивный водогазообмен; здесь полная смена объема по данным анализа дейтерия и трития происходит за время не более первых десятков тысяч лет. В пределах участка II концентрации гелия достигают уже предельных значений, которые может дать радиоактивный α -распад в отрезки времени, соизмеримые с абсолютным возрастом вмещающих пород. Так, фоновые концентрации для вод средней части Московского артезианского бассейна составляют 1 мл/л. Подобная концентрация в условиях отсутствия потерь гелия может возникнуть в породах с нормальной радиоактивностью примерно за 300—400 млн. лет. Следовательно, на участке II возможно равновесие гелия с вмещающей средой, но только в условиях абсолютного зстоя седиментогенных вод. Такой же уровень гелиенасыщения будет при наличии водообмена и дополнительном поступлении глубинного гелия.

Здесь мы сталкиваемся с многообразием условий гелиенасы-

щения, которые могут создаваться двумя принципиально отличными способами его поступления. Для суждения о реальности того или иного способа требуется привлечение новых данных, в частности о характере тектонических движений. Эти данные однозначно свидетельствуют в пользу наличия водообмена и пропорциональной подпитки системы глубинным гелием (Яницкий и др., 1974).

Для участка 1 явный избыток гелия относительно возможной его продукции за счет вмещающих пород очевиден. Например, в водах цоколя Русской платформы фоновые концентрации гелия достигают 5—10 мл/л; при длительном водозаборе эти концентрации не разубоживаются, а постепенно растут до 15—20 мл/л. Известны значения до 50—120 мл/л, что дает $(1-3) \cdot 10^6$ Па. Подобные концентрации уже нельзя объяснить с позиции сингенетического породам гелиенасыщения даже в условиях абсолютного застоя подземных вод, и единственной альтернативой здесь является признание преобладающей роли потока гелия из кристаллического субстрата.

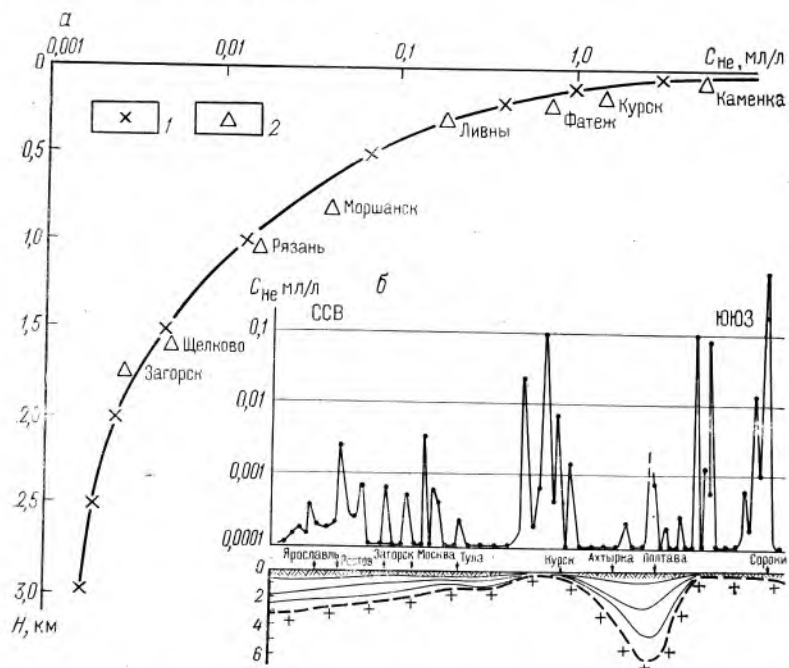


Рис. 5. Зависимость интенсивности концентраций гелия в приповерхностном слое (в интервале 50—100 м) от мощности осадочных пород (расстояния до фундамента):

а — обобщенные значения (по данным исследований в Казахстане, Средней Азии, на Русской платформе); б — по профилю водногелиевой съемки Ярославль — Сороки. 1 — точки статистических значений рассматриваемой зависимости; 2 — точки, взятые с профиля Ярославль — Сороки

Подтверждением глубинного питания являются материалы статистической обработки результатов региональной гелиевой съемки. На рис. 5,а показан профиль водногелиевой съемки от Ярославля до Сорок. На всем протяжении профиля пробы отбирались в приповерхностном слое (глубина отбора 50—70 м). По профилю обнаружены максимумы различной интенсивности, приуроченные к разломам. Заметно, что интенсивность максимумов в приповерхностном слое увеличивается на участках неглубокого залегания фундамента (Воронежский массив) или непосредственного выхода его на дневную поверхность (Украинский щит).

Аналитическое выражение кривой рис. 5,б для отмеченной зависимости имеет вид

$$C_{He}(\text{аном}) = \frac{A}{(X+B)^2}, \quad (2)$$

где A отражает интенсивность потока через единицу площади на уровне кристаллического субстрата;

B — средняя мощность осадочной толщи;

X — расстояние до субстрата в данной точке.

Таким образом, интенсивность максимумов гелия в приповерхностном слое уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния до кристаллического субстрата, т. е. здесь проявляется известное для всех физических полей затухание интенсивности, пропорциональное квадрату расстояния до источника.

Опыт бурения глубоких скважин показывает закономерное увеличение избытка давления по отношению к гидростатическому. В литературе этот эффект получил название «аномально высокое пластовое давление» (АВПД). Особенно сильно АВПД проявляется в районах с активной тектоникой. Очевидно, механизм питания гелием осадочной толщи, АВПД и гидровулканизм имеют единую природу, что связано с выходом глубинного флюида (Кропоткин, Валяев, 1965; Коробейник, Яницкий, 1975). Восходящие напорные потоки гелиеносных вод (часто гидротерм) выходят в горах на больших отметках, в том числе и на Памире, несмотря на то, что там глубинное давление должно преодолевать силу стока метеорных вод величиной в десятки мегапаскалей (Яницкий, Пименов, 1976). Это однозначно указывает на наличие в недрах Земли избыточного давления, развитого повсеместно, но с некоторыми вариациями его величины, что является нормальным следствием тектоники плит.

8. ВАРИАНТЫ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ГЕЛИЯ ЗЕМЛИ

Согласно принятой модели (Мамурин и др., 1969; Каменский и др., 1971) изотопный состав гелия глубоких сфер Земли легкий, близкий к космическому или метеоритному ($^3\text{He}/^4\text{He} \approx 10^{-4}$).

Подтверждением этого считают проявление гелия легкого изотопного состава в вулканических областях (Камчатка, Исландия), где характерны значения $^3\text{He}/^4\text{He} \approx 10^{-5}$. Снижение отношения от 10^{-4} до 10^{-5} здесь объясняют поступлением корового гелия. Еще больше этот вклад имеет место в континентальных условиях, что понижает отношение изотопов до 10^{-7} (табл 5). Наиболее тяжелый изотопный состав (10^{-8} — 10^{-9}) соответствует древним слоям осадочной толщи и гранитному слою коры.

Таблица 5

Изотопный состав гелия наиболее характерных природных объектов

Объект	Известная максимальная концентрация гелия			Отношение изотопов $^3\text{He}/^4\text{He}$	Источник сведений**
	Газовая фаза, об. %	Вода, мл/л	Твердая фаза, см ³ /г		
Железные метеориты	—	—	10^{-3}	10^{-2}	1, 2
Каменные метеориты	—	—	10^{-4}	10^{-4}	1, 2
Лунный грунт	—	—	10^{-3}	10^{-4}	1
Газы и воды вулканических областей	0,01	10^{-3}	—	$n \cdot 10^{-5}$	2, 3
Атмосферный воздух	$5 \cdot 10^{-4}$	—	—	$1,2 \cdot 10^{-8}$	1, 2
Газы и воды геосинклинальных областей	0,1	1,0	—	$n \cdot 10^{-7}$	2
Газы и воды платформ	1,0	10	—	$n \cdot 10^{-8}$	2
Месторождение гелиоспсных газов Реттлснейк (США)	8,0	120*	—	$5 \cdot 10^{-8}$	4
Газы и воды глубинных разломов	20,0	100	—	10^{-8} — 10^{-9}	5
Газы и воды эндогенных рудных месторождений	1—10	18	—	$n \cdot 10^{-8}$	1, 5, 6
Газы и воды радиоактивных месторождений	1—10	12	—	$n \cdot 10^{-8}$	1, 2, 6
Газы калийных солей	0,12	—	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-9}$	1
Радиоактивные минералы	—	—	До 5	10^{-9} — 10^{-10}	1, 2, 4

* Цифра получена путем расчета.

** 1 — «Изотопы...» (1971); 2 — И. Я. Азбель, Л. В. Хабарин (1975 г.); 3 — Ю. А. Шуколюков, Л. К. Левский (1972); 4 — Л. Т. Олдрич, А. О. Нир (1954); 5 — И. Н. Яницкий, В. В. Пименов (1976); 6 — Ю. А. Шуколюков, В. Б. Шариф-Заде, Г. Ш. Ашкинадзе (1973).

При обсуждении данной модели возникают, однако, необъяснимые вопросы. К одному из них относится правомочность постулата о тождестве изотопного состава современного метеоритного (космического) гелия и захваченного с протопланетным материалом первичного газа. В свете применяемой методики определения возраста метеоритов по отношению первичного и радиогенного гелия представляется маловероятным допущение указанного тождества во временном интервале порядка 4,5 млрд.

лет (Шуколюков, Левский, 1972); в ряде работ, например, показано, что изотопный состав гелия в метеоритах со временем изменяется из-за постоянной бомбардировки вещества частицами высокой энергии. Кроме того, известно, что вулканизм островных дуг связан с нисходящим движением участков верхней коры, где в зонах Бенъофа создаются аномально высокие давления. Механизм проникновения мантийного гелия в такие «реакторы» необъясним.

В порядке обсуждения можно предложить другую схему, в которой исходное количество первичного гелия в протопланетном материале соответствует изученной по метеоритам составляющей первичного газа, попавшего в недра Земли и изменившего свой состав как за счет частичных потерь, так и вследствие увеличения концентрации радиогенного ^4He . В результате отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ понизилось до 10^{-8} , а общая концентрация гелия повысилась.

Таблица 6

Состав первичного и радиогенного гелия в природных объектах

Объект	Концентрация гелия, см ³ /г		Источник сведений*
	Время отсчета		
	начальное	современное	
Метеоритное вещество			
средняя проба	1,5·10 ⁻⁷	3,5·10 ⁻⁵	1
железо-никелевая фракция	2,3·10 ⁻⁵	2,0·10 ⁻⁶	1
Ядро Земли	2,3·10 ⁻⁸	0,8·10 ⁻⁵	2
Мантия	1,5·10 ⁻⁷	1,1·10 ⁻⁵	2
Земная кора	1,5·10 ⁻⁷	1,3·10 ⁻³	2
Среднее для Земли с учетом потерь	1,5·10 ⁻⁷	2,76·10 ⁻⁵	2

* 1 — Ю. А. Шуколюков, Л. К. Левский (1972); 2 — В. П. Якуцени (1968).

* 1 — Ю. А. Шуколюков, Л. К. Левский (1972); 2 — В. П. Якуцени (1968).

Для проверки такой модели необходимо определить исходное количество и изотопный состав первичного гелия. В табл. 6 приведены опубликованные данные по составу первичного газа в метеоритах и по радиоактивному гелиенакоплению за время существования Земли как стационарного тела. При оценке гелиенасыщения хондритового вещества планеты можно принять параметры усредненного накопления за $4,5 \cdot 10^9$ лет с учетом периода полураспада урана и очевидных потерь гелия во времени. Эта цифра, по данным В. П. Якуцени, составляет $2,76 \cdot 10^{-5}$ см³/г. Сопоставим ее с вероятными равновесными концентрациями гелия в воде на основании материалов, рассмотренных в разделе 5. Дополнительно согласимся с ранее сделанными предположениями (Шуколюков, Левский, 1972), что концентрация гелия в минералах с плотной кристаллической упаковкой

отражает уровень гелиенасыщения, существовавший в зоне их образования.

В соответствии с данными табл. 6 расчетная упругость гелия для среднего состава Земли равна 10^3 Па, а для земной коры $3 \cdot 10^4$ Па. В природных условиях для нижних слоев осадочной толщи характерны упругости порядка $(1-2) \cdot 10^5$ Па; для верхней части погребенного кристаллического субстрата эта цифра достигает уже $(5-7) \cdot 10^5$ Па, а для таких месторождений гелиеносных газов, как Реттлснейк, — до $1,6 \cdot 10^6$ Па. Здесь очевидно несоответствие, поскольку для обеспечения такой высокой упругости необходимы столь же мощные источники гелия. Такие источники должны быть выше рассчитанных В. П. Якуцени по хондритовой модели: примерно в 50 раз для земной коры, в сотни раз — для аналогов земного ядра и в тысячи раз — для образований верхней мантии — рифтовых зон, где континентальная кора отсутствует (табл. 7).

Таблица 7

Отношение максимальных концентраций гелия в некоторых природных объектах и рассчитанных (по данным В. П. Якуцени, 1968) значений гелиенакопления в земных геосферах

Объект	Концентрация гелия, см ³ /г		$C_{\text{факт}}/C_{\text{теор}}$
	экспериментально установленная $C_{\text{факт}}$	теоретически допустимая $C_{\text{теор}}$	
Ядро Земли	—	$8 \cdot 10^{-6}$	—
Аналоги ядра — рудные минералы (магнетит и др.)	$4,8 \cdot 10^{-3}$	—	600
Мантия	—	$8 \cdot 10^{-8}$	—
Аналоги мантии — ультраосновные породы в области рифтовых разломов	$1,2 \cdot 10^{-2}$	—	1500
Земная кора (граниты)	—	10^{-3}	—
Минералы пневматолитовой фазы	$3,2 \cdot 10^{-2}$	—	32

Несоответствие теоретически возможных и экспериментально установленных концентраций гелия в реальных объектах с позиции хондритовой модели необъяснимо. Наиболее простым решением проблемы «избытка» гелия является допущение в недрах соответственно высокого уровня гелиенасыщения. Оценим в этой связи на основе показанных в разделе 5 фазовых распределений и данных керновой съемки величины равновесных концентраций

гелия в минералах и в воде. В табл. 8 приведены такие цифры для воды относительно содержания «избыточного» гелия в минералах при средней плотности вещества 3 г/см^3 . Сравнение этих величин показывает, что при концентрациях гелия, равных нескольким десяткам кубических сантиметров на килограмм твердой фазы, равновесные значения гелиенасыщения воды достигают величин, характерных для разломов кристаллического субстрата; для базальных слоев осадочной толщи такие же концентрации в зоне разломов обычны на глубине 2—3 км. В недрах Земли, судя по общей тенденции роста гелиенасыщения с глубиной, можно ожидать еще больших значений концентраций.

Такой подход позволяет объяснить природу отмеченного выше значительного (примерно стократного) «избытка» гелия относи-

Таблица 8

Расчетные концентрации гелия в воде, равновесные известным его концентрациям в твердой фазе

Минерал	Концентрация гелия в минералах, см ³ /г	Равновесная концентрация гелия в воде, мл/л	Источник сведений*
Берилл	$3,2 \cdot 10^{-2}$	100	1
Магнетит	$4,8 \cdot 10^{-3}$	15	2
Самородный висмут	$5,0 \cdot 10^{-3}$	22	2
Монацит	$1 \cdot 10^{-2}$	30	3

* 1 — В. В. Чердынцев, Е. М. Колесников (1964); 2 — П. М. Харлей (1956); 3 — Ю. А. Шуколюков, Л. К. Левский (1972).

Таблица 9

Изотопный состав гелия в минералах с нормальной радиоактивностью

Минерал	Отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$	Источник сведений*
Берилл, Эрепихе (Финляндия)	$6 \cdot 10^{-8}$	1
» Лемнес »	$5 \cdot 10^{-8}$	1
» Кейтон (США)	$1,2 \cdot 10^{-7}$	1
» Лапландия (Швеция)	$1,8 \cdot 10^{-7}$	1
Силикаты ультраосновных пород	$(2-5) \cdot 10^{-7}$	2
» жильный	$2,6 \cdot 10^{-8}$	3
» гнейсов	$1,4 \cdot 10^{-8}$	3
» гранитов	$8 \cdot 10^{-8}$	3
Рисчоррит	$9 \cdot 10^{-7}$	3
Калийные соли	$5 \cdot 10^{-9}$	4

* 1 — П. Н. Харлей (1956); 2 — «Изотопный...» (1971); 3 — Э. М. Прасолов, И. Н. Толстухин (1972); 4 — «Изотопы...» (1971).

тельно известных для хондритовой модели продуцирующих его источников.

Вернемся к изотопному составу гелия. В табл. 9 показано отношение $^3\text{He}/^4\text{He}$ для минералов с нормальной радиоактивностью, содержащих «избыточный» гелий. Ни в одном случае в них нет гелия легкого изотопного состава. Концентрации гелия в этих минералах обычно очень высокие. В противоположность этому в донных илах Мирового океана встречены образцы с «легким» гелием, однако только в тех из них, которые имеют характерную глинистую фракцию (табл. 10). Так, А. Я. Крылов и др. («Изотопы...», 1973) объясняют легкий изотопный состав гелия в красных илах наличием метеоритной пыли. Но можно дать и другое объяснение, поскольку на рис. 6, составленном для данной серии проб, заметна явная связь изотопного состава с концентрацией гелия.

Таблица 10

Изотопный состав гелия донного грунта Мирового океана.
По данным А. Я. Крылова и др. («Изотопы...», 1973)

Место отбора пробы, № станции; глубина, м	Состав грунта	Концентрация гелия, см ³ /г	Изотопный состав, $^3\text{He}/^4\text{He}$
Тихий океан			
5128, 5126, 51/1, 59/2; 5070—5981	Глина красная	$(2,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-6}$	$(1,35 \pm 0,53) \cdot 10^{-5}$
1566, 12/г, 12/е, 12/з; 10030	То же	$(1,2 \pm 0,27) \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Атлантический океан			
1606; 4955	»	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$
Д-2; 5320	»	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$
222; 5300	»	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Д-1; 1800	Песок алевритовый	$1,14 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
160; 215	То же	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-9}$
4; 200	»	$4,37 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$
49; 600	»	$3,65 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-8}$

В континентальных условиях заметно общее изменение упругости и изотопного состава гелия с глубиной. Так, по 28 интервально опробованным скважинам, расположенным в различных районах Советского Союза, упругость гелия сверху вниз увеличивается от 0,5 Па до нескольких сотен килопаскалей, а изотопный состав в этом же направлении становится более тяжелым (рис. 7).

Явные тенденции связи изотопного состава гелия с его концентрацией Ю. А. Шуколюков и Л. К. Левский отметили еще в 1972 г. Статистическая обработка более 300 таких проб позволяет определить эту связь для нормальных континентальных усло-

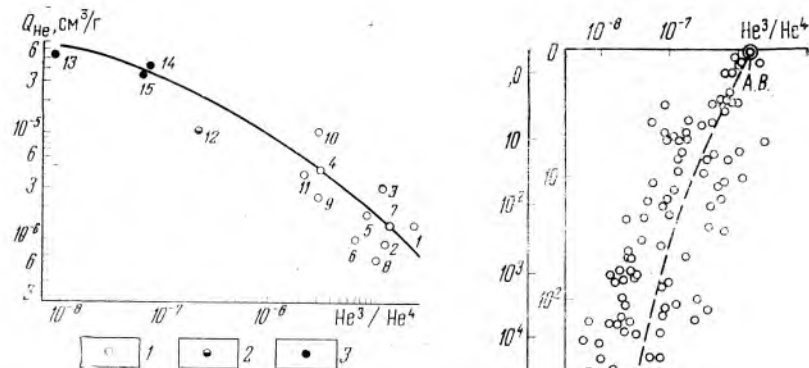


Рис. 6. Отношения изотопов и содержания гелия Q_{He} в грунтах Мирового океана (по данным А. Я. Крылова и др., 1973 г.).
1 — красные глины; 2 — переходные фации; 3 — пески. Цифры у точек — номера проб

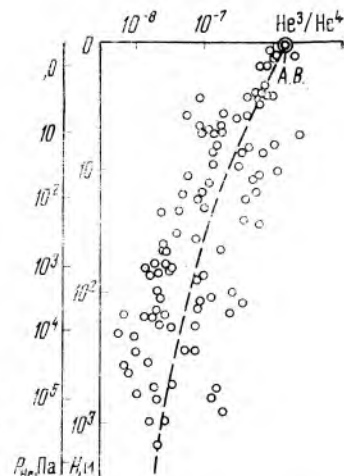


Рис. 7. Отношения изотопов и упругость гелия P_{He} в континентальных условиях (кроме геотермальных районов) в зависимости от глубины отбора проб по скважинам. Точка А. В. — положение рассматриваемых отношений для приземного слоя атмосферного воздуха

вий в диапазоне упругости более 0,5 Па как близкую к функциональной: $^3\text{He}/^4\text{He} = f P_{\text{He}}$. В других термодинамических условиях (вулканические и тектонически активные районы) отмеченная связь изменяется («Связь изотопного состава...», 1976).

Таким образом, ряд фактов больше согласуется с вариантом «тяжелого» изотопного состава гелия в недрах Земли ($^3\text{He}/^4\text{He} < 10^{-8}$) при высокой его концентрации ($P_{\text{He}} > 10^6$ Па). Источниками гелия в этом случае могут служить только эквивалентные концентрации радиоактивных элементов в подкоровой области, значения которых должны быть не ниже 10^{-3} вес. %. Геологическими аналогами подобных глубинных гелийпроизводящих очагов могут быть щелочные радиоактивные породы, например, карбонатитовые интрузии.

Разработка вариантов полевой гелиевой съемки производилась с учетом результатов многолетних исследований в области газовой съемки, применяющейся при геохимических методах поисков месторождений нефти и газа (Соколов, 1956 и др.), и в области структурной или рудной геологии (Фридман, 1970). Использован также опыт гелиеметрических исследований, выполненных Э. К. Герлингом (19576), А. Г. Граммаковым, В. С. Глебовской, И. М. Хайковичем (1965), а также зарубежными специалистами (Grip, Ödman, 1944; Hugo, 1963 и др.).

В нефтегазовой геологии основное внимание при полевых работах уделялось определению концентраций углеводородов в подпочвенных газах, грунтовых, пластовых водах и породах. При гелиевой съемке соответственно были изучены и усовершенствованы варианты опробования газов (подпочвенного, грунтового воздуха и атмосферы горных выработок), грунтовых, пластовых и жильно-трещинных вод, наконец, образцов грунта, штуфов и керна коренных пород. Все перечисленные виды съемки рассмотрены ниже. Более подробно описаны наиболее эффективные варианты, в то время как для недостаточно экспрессных дана лишь общая характеристика и они приводятся только для сравнения.

Таблица 11

Затраты времени на изучение различных форм гелия

Затраты времени	Твердорастворенный	Окклюдируемый	В кернах и штуфах	В воде	В газах
Условные часы	100	50	20	0,2	0,1

В табл. 11 приведены затраты времени на подготовку и выполнение одного анализа по всем вариантам гелиеметрических исследований. Сопоставление этих показателей выгодно отличает съемку по подвижному гелию, особенно варианты съемки по водной и газовой фазам. С помощью таких исследований фиксируется распределение концентраций гелия, отражающих его поток.

1. ГАЗОГЕЛИЕВАЯ СЪЕМКА

Основные объемы газогелиевой съемки выполнены по шпурам в варианте обычной наземной газовой съемки. Проходка шпуров механическая с помощью различных вибро- и гидрозадавливателей глубиной от 2—3 до 10—15 м. Наиболее рацио-

нальное в настоящее время средство для проходки шпуров — портативный ручной шнековый мотобур «М-1».

Испытаны различные способы отсоса газовой пробы из шпура: с тампонажем и без тампонажа; сразу после проходки и с экспозицией. Для тампонажа применялись пакер-зонды, а также пробки с цементацией устья и заливкой глинистым раствором. Отсос из герметизированных шпуров, так же как негерметизированных, производился вакуумно-циркуляционным способом. В качестве отсасывающих средств применялись ручные насосы Камовского и Шинца, в отдельных случаях форвакуумные насосы.

Результаты сопоставления перечисленных способов оборудования шпуров показывают их практическое тождество, что обусловлено наличием в зонах восходящего потока заметного напора газа, отжимающего из шпура атмосферный воздух.

В практике газогелиевой съемки отмечены многочисленные случаи, когда газ из шпуров, вскрывших плотный покровный суглинок, выделялся с шумом и выбросом воды под избыточным давлением в $(1-2) \cdot 10^5$ Па до сработки небольших запасов газа под экранирующим слоем. Обычно такое истечение газа продолжалось в течение нескольких десятков минут, реже первых часов. После сброса избыточного давления устанавливается стабильное истечение газа. По этой причине газовыделение в зонах разломов, как правило, отличается относительной стабильностью во времени. Режимные наблюдения за некоторыми из них в условиях тектонического покоя производились в течение трех-пяти лет; они показали достаточную стабильность аномалий.

Исследована зависимость результатов съемки от глубины проходки шпуров и характера грунта. В достаточно пористых грунтах (песках, супесях, лёссах) концентрация гелия на аномальных участках постепенно возрастает до глубины 7—10 м, и ниже наблюдается зона некоторого насыщения. Интенсивное рассеяние в пределах первых метров в этом случае обусловлено известным эффектом «дыхания» почвы, связанным с изменениями атмосферного давления и температуры. В плотных глинах и суглинках распределение более сложное: проходка куста шпуров на разную глубину, как правило, показывает здесь фоновую концентрацию до тех пор, пока снаряд не войдет в проницаемые породы (например, в щербенистую кору выветривания).

Полученные по кустам шпуров данные удовлетворительно согласуются с наблюдениями по необсаженным скважинам (шнековым и колонковым): даже на аномальном участке сигнал гелия в стволе скважины появлялся только тогда, когда технический раствор при оседании вниз проходил слой непроницаемых пород и в стенках вскрывались нижележащие газонасыщенные образования. После их обнажения концентрация гелия в стволе скважины быстро возрастала, достигая вскоре

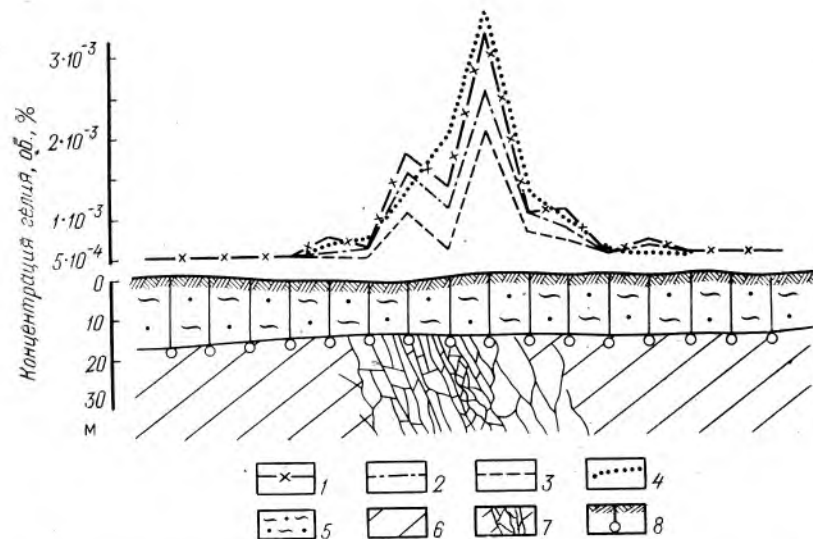


Рис. 8. Схема распределения концентраций гелия в кровле щебенистой коры выветривания в зоне глубинного разлома (Северный Казахстан, 1964 г.).

График отражает пульсирующий характер аномалии, проявившейся при четырехкратном повторном опробовании: 1 — 16 июля, 2 и 3 — соответственно 3 и 11 августа, 4 — 24 сентября; 5 — покровные суглинки; 6 — коренные породы; 7 — зона разлома; 8 — шпур гелиевой съемки

практически постоянного значения, которое сохранялось до конца периода наблюдений. Значительно реже в скважинах наблюдались более сильные выбросы газов сквозь буровой раствор. При углеводородном составе газа в этом случае могут происходить вспышки и взрывы, что требует соблюдения мер предосторожности.

Общая схема распределения гелия в области мобильного разлома при его перекрытии покровными суглинками показана на рис. 8. При малой глубине шпуров (1—2 м) аномальная концентрация здесь фиксируется только в очень локальной по ширине зоне нарушения суглинков, в то время как по шпурам, вскрывающим весь экранирующий слой, отмечается достаточно обширная область растекания аномальных концентраций.

Гелиевая съемка по шпурам и скважинам горных выработок не вызывает особых затруднений, поскольку газ в них интенсивно выделяется из стенок и вытекающей воды. Пробы здесь отбирались в колбы вакуумно-циркуляционным способом на устье или составной металлической трубкой с разным заглублением.

В геотермически аномальных районах газ выбрасывается с парами воды при температуре до 100°C и под большим давлением; в вулканических районах температура сольфатар еще выше. Поэтому важным дополнительным элементом отбора

становится предварительное охлаждение струи с поглощением компоненты кислых газов.

Последующее совершенствование съемки должно предусматривать одновременное изучение гелия и других газовых индикаторов: метана, водорода, углекислого газа, паров ртути и т. п. Целесообразность комплексной газовой съемки определяется большими вариациями компонентного состава подземных газов, явно связанными с тектоническим режимом фрагментов земной коры (Еремеев, Ершов, Яницкий, 1971). В условиях резкого уменьшения интенсивности какого-то одного компонента (в том числе и гелия) комплексная съемка будет фиксировать другие индикаторы, аномальные значения которых характеризуют различия геодинамики участков литосферы.

2. ВОДНОГЕЛИЕВАЯ СЪЕМКА

Подземные воды имеют повсеместное распространение. Ниже зеркала (или пьезометрического уровня) они занимают практически все свободное пространство — сообщающиеся поры, трещины раскрытого типа, за исключением случаев, когда коллекторы заполнены свободным газом (углеводородами, азотом, углекислотой). Поэтому подземные воды являются наиболее распространенным растворителем и носителем гелия.

Растворимость гелия в воде достаточно высокая. При стопроцентной концентрации, атмосферном давлении и температуре +5°C в 1 л воды может раствориться 9 мл гелия. Соответственно упругость его при этом равна $1 \cdot 10^5$ Па. С увеличением давления растворимость растет практически линейно: 2×10^5 Па — 18 мл; $5 \cdot 10^5$ — 46; $2,5 \cdot 10^6$ — 230; 10^7 — 924; $5 \cdot 10^7$ — 4200; $10 \cdot 10^8$ Па — 7400 мл. С увеличением температуры растворимость гелия также повышается, но в меньшей степени. Например, при 100°C в 1 л воды может раствориться 12 мл, при 200—30, при 300°C — 75 мл (Намиот, Бондарева, 1961).

Наличие в воде повышенных концентраций других газов, в том числе часто встречаемых в подземных условиях азота и метана, существенно увеличивает растворимость (адсорбцию) гелия.

Все перечисленные и обычно одновременно действующие в природных условиях факторы увеличивают возможность растворения гелия. Единственным, несколько сдерживающим фактором, является минерализация воды. Так, при молярной концентрации NaCl в 1 л воды может раствориться не 9 мл, а только 7,6 мл гелия, при двухмолярной — 6 мл, при пятимолярной (рассол) около 4 мл. Однако этот фактор действует намного слабее суммы вышеуказанных, что определяет практически неограниченные возможности растворения гелия в подземных водах на больших глубинах.

Таблица 12

Отношение фактических и возможных концентраций гелия в воде

Глубина, м	Концентрация гелия, мл/л		Отношение C_1/C_2
	установленная в подземных водах C_1	теоретически возможная C_2	
100	10	90	0,11
500	30	500	0,06
2000	54	1600	0,03

В табл. 12 приведены реальные и возможные концентрации растворенного в воде гелия, а также числа, показывающие отношение этих величин. Последние подтверждают большой недостаток присутствующего в подземных водах гелия относительно количеств, которые могут раствориться в соответствующих условиях. Такой «дефицит» с глубиной возрастает, несмотря на увеличение в том же направлении реального гелиенасыщения подземной среды. Однако и эти сравнительно небольшие концентрации гелия (как отмечено в разделах 7 и 8 главы II) значительно превосходят предельно допустимые уровни гелиенасыщения, соответствующие хондритовой модели Земли.

Распределение подземных вод в литосфере по вертикали неравномерное. В общем случае водообильность увеличивается от зеркала вниз и достигает какого-то максимума в той части разреза, где наибольшая эффективная пористость пород сочетается с наилучшими условиями питания подземных вод. В осадочной толще водообильность чередуется от больших величин в пластах-коллекторах до минимальных значений в разделяющих их экранях.

Для пород кристаллического субстрата максимальная водообильность щебенистого и жильно-трещинных коллекторов в условиях равнинного рельефа отмечается на глубине 30—70 м, т. е. в области сочленения раскрытых тектонических нарушений с зоной выветривания (Голубев, Осипов, Яницкий, 1970). Ниже с повышением горного давления трещиноватость и водообильность уменьшаются, что установлено во многих случаях при проходке глубоких шахт, где на уровне 300—500 м обводненные зоны встречаются весьма редко. Так, становятся экзотичными обводненные зоны на горизонтах 390 и 430 м золоторудных месторождений Северного Казахстана — Желамбет и Бестюбе.

Гелий в воде находится в состоянии истинного раствора. Его упругость в растворе равновесна концентрации в окружающей среде — породах и газах. Разумеется, полное равновесие возможно только в идеализированных условиях, характеризующихся весьма медленным и равномерным массообменом флюи-

дов, омывающих твердую фазу. В реальных условиях подземной геосферы происходит восстановление постоянно нарушаемого равновесия, именуемого динамическим равновесием.

В наземных водоемах (озерах, болотах, морях и океанах), а также в водотоках (ручьях, реках) содержание гелия более равномерное; оно преимущественно равносильно концентрации гелия в атмосферном воздухе ($5 \cdot 10^{-5}$ мл/л). Но и здесь на локальных участках донной разгрузки содержание гелия увеличивается в соответствии с интенсивностью питающего источника.

Требования к опробованию подземных и открытых водоемов различны: в первом случае оказывается достоверной приповерхностная зона (30—50 м для условий выхода фундамента на поверхность и до 120 м для мощной осадочной толщи); во втором случае съемку необходимо вести по придонному слою. Объяснение указанного различия для обоих случаев одинаковое: вариации поля гелия контрастнее выражены в зоне максимального вертикального градиента его концентрации. В первом случае это приповерхностные слои активного водогазообмена; во втором — придонные слои, куда по донным трещинам внедряются подземные воды.

На первом этапе исследований для извлечения гелия из воды применялась вакуумная дегазация, предложенная В. П. Савченко в 1935 г. По этому методу в качестве дегазатора использовалась десятилитровая бутылка, предварительно откачанная примерно до 1 кПа. Вода напускалась до половины объема, что обеспечивало в дегазаторе разрежение около $5 \cdot 10^4$ Па и сохраняло условия кипения воды. Выделившийся газ выжимался с помощью резиновой камеры в газоприемник. В процессе такой дегазации извлекалось около 90% растворенного в воде гелия (Савченко, 1935).

Достаточно надежный способ дегазации по методу Савченко оказался малопродуктивным в полевых условиях. Поэтому начиная с 1958 г. Н. И. Мусиченко стал применять упрощенный способ с объемом дегазатора 1 л и с вытеснением опробуемой водой выделившегося газа в пробозаборник (рис. 9). Давление в дегазаторе во время напуска пробы изменялось примерно от 1 до 100 кПа, что существенно уменьшило уровень извлечения растворенного газа и гелия, который не превышал 50%.

Дальнейшее развитие водогелиевой съемки с применением массового отбора проб потребовало полного исключения вакуумной дегазации. В 1966—1970 гг. с этой целью использовался предложенный автором распределительный способ, при котором опробуемая вода наливалась в бутылку на 9/10 ее объема под атмосферным давлением, бутылка плотно закупоривалась резиновой пробкой. Перераспределение гелия между водой и оставленной (1/10) частью атмосферного воздуха обеспечивало пропорциональное (исходной гелиенасыщенности пробы) прира-

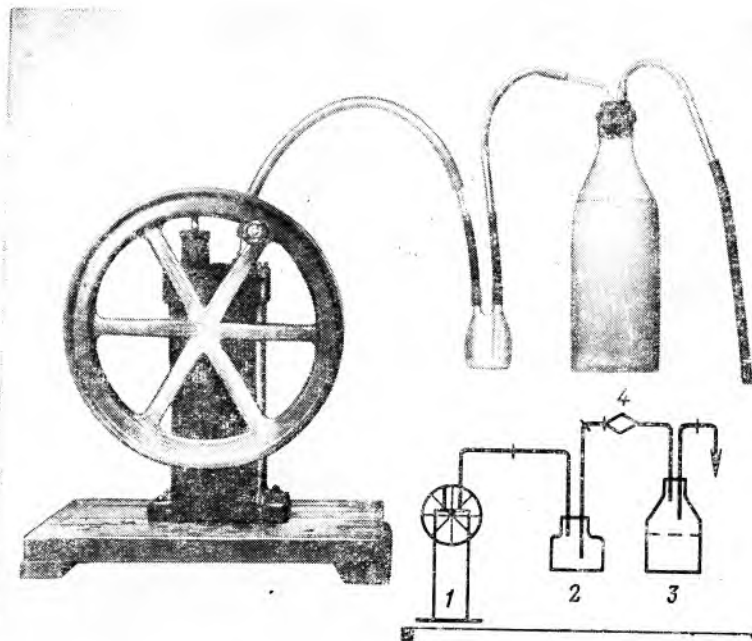


Рис. 9. Схема дегазации воды упрощенным способом с выжиманием выделившегося газа водой в промывалку.
1 — насос Камовского; 2 — пробозаборник; 3 — дегазатор емкостью 1 л; 4 — стеклянные переходники

шение концентрации в газовой фазе. Такое приращение фиксировалось при анализе газовой фазы; по величине приращения с точностью, не меньшей, чем при вакуумной дегазации, определялось исходное содержание гелия в опробуемой воде.

С созданием прибора мембранного типа стал возможен прямой анализ гелия в воде без каких-либо промежуточных операций его извлечения. Это повысило чувствительность анализа в десятки раз и позволило выполнять массовые исследования проб непосредственно на водопункте.

Водогелиевая съемка использована при исследованиях в различных геологических, морфологических и климатических условиях: Кольский полуостров и Карелия; Прибалтика и Молдавия; равнины Русской платформы, Зауралья и Западно-Сибирской низменности; горы Крыма, Кавказа и Средней Азии, включая Памир, и др. Варианты съемки опробованы на трассе БАМ, в районах вечной мерзлоты (Якутия), в термальных и вулканических зонах — Забайкалье, Курильские острова, Камчатка, Исландия. Результаты применения этого метода подтвердили его эффективность и высокую информативность, что определяет перспективы развития гелиевой съемки.

На раннем этапе исследований, как и при углеводородной съемке, отсос свободного газа из породы производился вакуумным способом. Поиск более эффективных способов обработки позволил отказаться от вакуумирования. Еще в 30-х годах В. Г. Хлопин показал, что глубокое вакуумирование образца не дает столь высокого извлечения из него гелия, как при частичном разрежении $[(3-4) \cdot 10^4 \text{ Па}]$ в атмосфере метана. Тот же эффект был получен позже различными исследователями при использовании в качестве газа-наполнителя азота и водорода.

Физико-химическая основа процесса объясняется отмеченным выше наличием ближних межатомных связей гелия с вмещающей средой. Эти связи имеют место в реакции гелия как с твердым веществом породы, так и с заполняющими ее газами. При высоком разрежении связь гелия с газом-наполнителем становится меньше уровня связи с породой, вследствие чего миграция гелия из образца в вакуум практически прекращается.

Отмеченные особенности позволили использовать для керновой съемки аналог распределительного способа, описанного выше для воды. По этой методике поднятый из скважины керн сразу же эвакуировали в герметичный сосуд (керновый стакан), заполненный водой. После завинчивания крышки к стакану присоединяли через два штуцера стеклянную колбу-барбатор, заполненную водой и атмосферным воздухом (рис. 10). Дозу воздуха прибавляли на ранней стадии работ, когда анализ выполняли масс-спектрометрическим способом и газовая фаза требовалась для напуска в прибор. Наличие двух соединительных трубок обеспечивало в закрытой системе циркуляцию воздуха и воды. Нормальное положение кернового стакана с подключенным барбатором показано на рис. 10. При этом воздух находился в стакане в контакте с испытуемой породой. Выделяющийся из керна гелий попадал в воду или сразу в газовую фазу. Через небольшое время (1—2 сут) при трех-пятикратном переворачивании системы возникало равновесие свободного подвижного гелия: его содержание в воде, газе и породе уравнивалось.

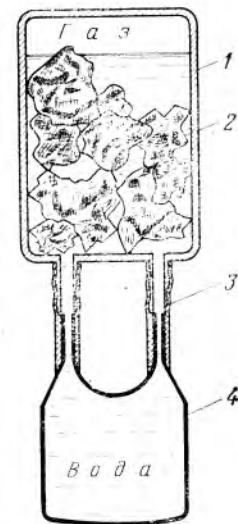


Рис. 10. Система для изучения количества свободного подвижного гелия в твердой фазе (керне или штуфах).
1 — керновый стакан; 2 — куски породы; 3 — переходники с зажимами; 4 — сменный стеклянный пробозаборник

Для определения выделившегося количества гелия систему переворачивали в исходное положение и легким встряхиванием добивались полного перетекания газовой фазы в барбатор, после чего соединительные трубки перекрывали зажимами и отсоединяли. В отключенном барбатере определяли содержание гелия в газе и уточняли объем газа, а к керновому стакану сразу же подключали другой барбатор с атмосферным воздухом и чистой водой. Такие циклы повторяли до прекращения изменений содержания гелия в газовой фазе. Количество циклов зависело от первичной гелиенасыщенности образца: при низкой концентрации достаточно было выполнить три-пять циклов; в аномальном случае число их могло достигать 15.

Количество выделившегося в первом цикле гелия составляло:

$$V_1 = n \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 50, \quad (3)$$

где $n \cdot 5 \cdot 10^{-6}$ — измеренное в барбатере содержание гелия, мл/л;
50 — объем газовой фазы, мл.

Количество гелия в воде отключаемого барбатера не учитывалось, поскольку оно не более 1/100 его доли в газе, что не превышает погрешности анализа.

Полное количество выделившегося гелия определялось суммированием объемов по единичным циклам:

$$V_{\text{He}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n. \quad (4)$$

Масса исследуемой пробы устанавливалась после завершения газоотделения и вскрытия системы; в окончательном виде гелиенасыщенность выражалась в см³/г.

Для рассмотренной системы была установлена возможность упрощенной оценки гелиенасыщения по первому циклу. В этом случае каждый образец выдерживали в системе стандартное время — 3 сут. Эмпирическая формула расчета при емкости кернового стакана 1 л и объеме воздуха в системе 50 мл имела следующий вид:

$$V_{\text{He}} = 1,8 \cdot n \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ мл}, \quad (5)$$

где n — измеренная в первом цикле концентрация гелия.

С применением приборов мембранного типа анализ может быть упрощен, а точность его значительно повышена путем использования в качестве фазы-наполнителя кернового стакана одной воды. Добавление воздуха целесообразно только при изучении сильно гелиенасыщенных образцов. Время газоотделения также можно уменьшить за счет создания подогреваемой до 30—40°C конвективной циркуляционной системы.

Рассмотренный способ керновой съемки дает только нижнюю границу гелиенасыщения породы, поскольку часть свободного подвижного гелия теряется при выбуривании керна и при его подъеме на поверхность, сопровождающемся сбросом гидростатического давления. Эти потери в определенной мере пропор-

циональны глубине бурения. Для проведения точных исследований требуется применение устройств, обеспечивающих надежную герметизацию керна еще на забое скважины.

4. ВЫБОР

ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА СЪЕМКИ

Параллельные исследования газа, воды и керна в пределах локальных участков показали удовлетворительное соответствие в оценке уровня гелиенасыщения, что позволяет рекомендовать использование в производственных масштабах наиболее простого способа. Таким способом является водногелиевая съемка. Этот вид работ позволяет изучать поле гелия в любых условиях с минимальной затратой средств, т. е. с максимальной экономической эффективностью. Остальные варианты следует рассматривать только как вспомогательные, пригодные для решения дополнительных задач.

Большую часть стоимости съемки составляет отбор проб, включающий объезд точек съемочной сети, обеспечение условий опробования на намеченном пункте и собственно отбор. Если транспортные затраты и стоимость отбора проб по всем вариантам съемки сопоставимы, то стоимость подготовительных операций колеблется в больших пределах. Например, для отбора с достоверного горизонта пробы породы (с поверхности такие пробы неинформативны) необходимо бурение скважины или проходка горных выработок; для газовой съемки также требуется бурение шпуров или скважин.

Водногелиевая съемка в большинстве случаев не требует подобных подготовительных операций, поскольку может выполняться по сети имеющихся природных или созданных человеком водопунктов. Так, в европейской части Советского Союза (кроме Крайнего Севера) существует кондиционная сеть водозаборных скважин, достаточная для создания карт масштаба до 1:1 000 000. К районам с подобными условиями можно отнести Кавказ и горные части Средней Азии с учетом множества природных родников. Только в засушливых пустынных районах можно обсуждать целесообразность замены водногелиевой съемки газовым вариантом. При этом следует помнить, что и здесь бурение и опробование специально предназначенных для съемки скважин (с учетом параллельного гидрогеохимического опробования) могут оказаться более эффективными, чем газовый вариант исследований.

Проблематична пока методика гелиевой съемки в условиях вечной мерзлоты, где вариант керновой съемки по представительному горизонту (на глубине 10—15 м) должен рассматриваться в качестве основного. Дополнительные исследования позволят уточнить порядок комплексирования вариантов гелиевой съемки для различных региональных условий.

1. ОБЪЕКТЫ НАБЛЮДЕНИЯ

Методика водногелиевой съемки разрабатывалась на первых этапах в достаточно простых условиях Казахского щита, характеризующегося слабохолмистым рельефом, приповерхностным залеганием фундамента и пассивной гидродинамикой. Перепады концентраций гелия на глубине первых десятков метров достигали здесь пяти порядков. В таком большом диапазоне изменения малых концентраций не уделялось внимания.

Возникшая позже проблема изучения характера распределения гелия в приповерхностном слое мощной осадочной толщи (Московская синеклиза) поставила задачу регистрации весьма слабых вариаций концентраций, соизмеримых со значениями, близкими к содержанию гелия в атмосферном воздухе и к равновесной ему упругости в подземных водах.

Расширился состав опробуемых водопунктов, куда вошли все действующие водозаборные скважины (кроме оборудованных эрлифтной системой подачи воды), все поисково-разведочные и эксплуатационные скважины, а также колодцы и родники. Развитие работ на открытых водоемах (озерах, морях) и водотоках (ручьях, реках) обусловило универсальность метода, охватив исследования всю гидросферу. Это потребовало обеспечения необходимой точности опробования и анализа во всем диапазоне встречаемых концентраций, увеличившемся до семи порядков (от долей паскалей до нескольких мегапаскалей). Такая задача обусловила дальнейшее совершенствование способов водногелиевой съемки с достижением максимальных возможностей метода как по технике отбора проб, так и в части их анализа.

2. ХАРАКТЕР
ФАЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Выполненные эксперименты показали, что для изучения содержаний гелия в подземных водах в любых геологических условиях необходимо обеспечить следующие требования:

а) извлечь в точке опробования ненарушенную пробу, все параметры которой идентичны исходным;

б) сохранить воду в пробозаборнике до анализа с естественной концентрацией гелия;

в) выполнить анализ на приборе с получением оценки упругости гелия, полностью соответствующей исходной в изучаемой природной среде.

Соблюдение всех перечисленных условий оказалось невозможным хотя бы потому, что технические средства не позволяют вести анализ на глубине, а извлеченная на поверхность газонасыщенная вода немедленно вскипает, вследствие чего изменяются ее показатели.

Если обозначить исходное содержание гелия в воде в точке опробования $C_{ист}$, а полезный сигнал прибора от анализируемой пробы C_1 , то в соответствии с участвующими и одновременно влияющими факторами будем иметь следующие равенства:

$$C_{ист} = C_1 V_r t M; \quad (6)$$

$$C_1 = \frac{C_{ист}}{V_r t M}, \quad (7)$$

где V_r — количество растворенного в воде газа (так называемый газовый фактор);

t — температура воды;

M — минерализация воды.

Из равенства (6) видно, что разница между полезным сигналом и истинной концентрацией может быть очень большой, поскольку она определяется одновременным участием в знаменателе трех факторов — минерализации, температуры и газонасыщенности воды.

Члены t и M определяют растворимость газа в воде и являются элементами закона Генри, устанавливающего количественную взаимосвязь растворенного и свободного газов в равновесной системе. В соответствии с этим законом фазовое равновесие системы при коэффициенте растворимости R имеет вид

$$V_r = R V_v, \quad (8)$$

где V_r и V_v — соответственно количество газа в свободной и растворенной фазах.

Поскольку R учитывает роль t и M , уравнение (7) можно написать в виде

$$C_1 = \frac{C_{ист}}{V_r R}. \quad (9)$$

На основании равенств (6) — (9) обосновывается выбор оптимальных способов водногелиевой съемки.

Ведущую роль при отборе проб имеет газонасыщенность воды. Перепад этого параметра в естественных условиях достигает двух порядков, а упругость гелия — семи порядков. При низких значениях газового фактора (20—30 мл/л) и упругости гелия до 100 Па обеспечение высокой точности опробования не вызывает серьезных затруднений. При упругости гелия более 100 Па повышаются требования к отбору проб даже в условиях нормального газового фактора. Еще более сложно обеспечить высокую достоверность опробования при повышенном (30—100 мл/л) и высоком (более 100 мл/л) газовом факторе.

Применение вакуумной дегазации не решает поставленных задач, а в ряде случаев вносит дополнительные погрешности за счет неполного удаления воздуха при вакуумировании и частичной потери гелия из раствора. Поэтому основное внимание было направлено на отработку опытным путем более простых и надежных способов отбора и анализа проб, базирующихся на новых возможностях измерительной техники.

3. ОТБОР ПРОБ

По данным опробования на различных глубинах установлено, что в приповерхностном слое имеет место абсолютное преобладание вод с нормальным газовым фактором. Воды с повышенным газонасыщением встречаются в условиях выхода кристаллического субстрата на дневную поверхность на площади, составляющей не более чем первые проценты, а в области развития осадочной толщи — на еще меньшей площади. Это обеспечивает малое доленое участие члена V_r в формулах (6) — (9). Поскольку случаи повышенной газонасыщенности воды редки и при встрече они надежно фиксируются визуально еще в процессе опробования, возникает возможность простейшего отбора воды наливным способом в стеклянные емкости. На водопунктах с повышенным газовым фактором применяется раздельное опробование: отбираются вода со сброшенным излишком газа и чистая газовая фаза. Такой прием полностью обеспечивает достоверность съемки при любых значениях газового фактора, встречаемых в природных условиях.

Наполнение пробозаборников (обычных бутылок) производится без контакта воды с атмосферным воздухом через резиновую трубку, подсоединенную к источнику; второй конец трубки опускается до дна сосуда. Вода напускается в режиме спокойной струи с трехкратной сменой объема сосуда.

Закупорка бутылок резиновыми пробками обеспечивается известным в гидрогеологии «бескислородным» способом путем применения тонкой проволоки, предварительно вставляемой в горлышко. Затем вставляется пробка и при покачивании ее из стороны в сторону излишняя вода выжимается в образуемую проволокой щель. Этим достигается сброс давления в бутылке, без чего пробка не заглубляется или давлением выбивается дно бутылки. После надежной закупорки проволока выдерживается; на пробку в это время необходимо оказывать нажим во избежание отдачи*. Вскоре резина пробки прилипает к стенкам горлышка, что обеспечивает последующую сохранность проб.

* При вставлении пробок с некоторым усилием во избежание раздавливания бутылок и пореза рук обеспечиваются следующие меры техники безопасности: а) бутылки отбираются без трещин и выбоин; б) дно бутылки ставится на мягкую подкладку; в) все работы выполняются в брезентовых рукавицах.

Необходимо убедиться, что пробка не вылезает из бутылки сразу же после выдергивания проволоки, что происходит в горлышках с конусом наружу. Такие бутылки должны выбраковываться еще до начала работы, а в случае обнаружения их при отборе следует повторно взять пробу в другую бутылку.

С целью обеспечения устойчивых показаний прибора при анализе используют бутылки объемом не менее 200 мл. С другой стороны, не следует применять бутылки емкостью более 500 мл, так как большая часть воды в них остается неиспользованной. Наиболее удобными и общедоступными пробозаборниками являются бутылки емкостью 250—350 мл; для закупорки их используют резиновые пробки № 16.

В табл. 13 показан установленный в ходе работ уровень потерь гелия из воды с нормальным газовым фактором при различных способах наполнения бутылок. Хорошая воспроизводимость показаний прибора служит признаком достоверного отбора проб, что достигается с помощью резиновой трубки в режиме циркуляции. Однако для воды с повышенным газовым фактором, отличной от нормальной температурой и минерализацией, такой способ наполнения неприемлем из-за большой значимости

Таблица 13

Потери гелия из воды с исходной концентрацией $2,3 \cdot 10^{-3}$ мл/л при различных способах наполнения бутылок

Способ наполнения бутылки	Измеренная в бутылке концентрация гелия, мл/л	Потери гелия при наполнении указанным способом, %
Сильно разбрызгивающаяся струя с перепадом давления $5 \cdot 10^5$ Па	$6,9 \cdot 10^{-4}$	70
Спокойная струя при расстоянии между краем и горлышком 10 см	$1,9 \cdot 10^{-3}$	17
Спокойная струя при поднесении бутылки к крану вплотную с направлением струи на дно	$2,03 \cdot 10^{-3}$	12
Спокойная струя при поднесении бутылки к крану вплотную с направлением струи по стенке	$2,1 \cdot 10^{-3}$	9
С помощью сифона резиновой трубкой, опущенной до дна бутылки с трехкратной сменой объема	$2,3 \cdot 10^{-3}$	1

членов, входящих в знаменатель формул (7), (9). В качестве примера рассмотрим анализ воды, постоянно откачиваемой глубинным насосом из скв. 12581, расположенной на территории Московского мясокомбината (сателлит Боевской скважины). Глубина водозабора здесь 1370 м, температура воды на выходе $+32^\circ\text{C}$, минерализация 270 г/л, газовый фактор 500 мл/л. Такая вода на выходе мгновенно вскипает, сбрасывая излишний

газ, в том числе и гелий. Поэтому даже при экстренной закупорке остаточное содержание гелия в воде (полезный сигнал C_1) не превышает 0,15 мл/л. В то же время в газовой фазе, отобранной отдельно, содержание гелия равно 3 об.%, что при указанном газовом факторе дает 15 мл/л. Это примерно в 100 раз больше, чем при прямом измерении сигнала гелия в воде, т. е. C_1 от $C_{ист}$ составляет всего 1%.

Выше по разрезу в водах Московского артезианского бассейна газонасыщенность, минерализация и температура постепенно понижаются, что соответственно повышает значимость сигнала C_1 . На глубине 100—200 м $C_1/C_{ист}$ достигает 97—99%, что полностью обеспечивает требуемую высокую воспроизводимость измерений с применением простейших способов отбора проб (табл. 14).

Таблица 14

Отношение измеренного сигнала C_1 на выходе скважины к концентрации гелия в водах Московского артезианского бассейна ($C_1/C_{ист}$)

Водоносный горизонт	Глубина залегания, м	Сигнал прибора C_1 , мл/л	Истинное содержание гелия в воде $C_{ист}$, мл/л	$C_1/C_{ист}$, %
Подольско-мячковский пресноводный	100—150	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	100
Серпуховско-окский пресноводный	200—250	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	93
Нижекамменноугольный с сульфатными водами	370—400	$7 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	87
Среднедевонский с хлоридными водами	900—1000	0,4	2,0	20
Нижедевонский с хлоридными рассолами	1400	0,15	15,0	1

Как отмечено выше, воды с повышенным газовым фактором при опробовании вскипают. Отбор проб в этом случае ведется отдельно — отбираются чистая газовая фаза и дегазированная вода. По существу такая операция соответствует отбору глубинных проб герметическим или телескопическим водоносами с разделением последующим наполнением бутылок газовой фазой и водой с помощью переводника пробы (Корценштейн, 1976). Для выполнения указанной операции лучше всего использовать газоотделитель объемом 3—5 л, изготовляемый из склянки с тубусом (рис. 11). Способ газоотделения основан на создании в системе незначительного разрежения за счет разницы сечений входного и выходного отверстий. Перепад давлений обеспечивается положением питающей и сливной трубок с разностью высот 1—1,5 м. На выходе газоотделителя вытекает вода с

Рис. 11. Конструкция газоотделителя, изготовленного из склянки с тубусом. 1 — корпус; 2 — входная трубка с разбрызгивателем; 3 — вводная резиновая трубка; 4 — пробки; 5 — выводная трубка; 6 — вакуумная трубка; 7 — вода; 8 — выделенный из воды газ. Газоотделитель показан в положении выпуска газа по трубке 5 в приемную бутылку; при газоотделении прибор переворачивается вверх дном



Рис. 12. Опробование ревуших фумарол вулкана Менделеева на Кунашире (Курильские острова, 1976 г.).

1 — парогазовый грифон с давлением газа до $7 \cdot 10^5$ Па; 2 — газоотделитель и поглотитель кислотных компонентов; 3 — термостат; 4 — анализатор гелия



практически нормальным газовым фактором; газ скапливается в склянке.

Дебит газа и воды в изучаемом водопункте определяется измерением объемов фаз в единицу времени; газовый фактор рассчитывается на основании замера количества газа, накопившегося в системе относительно фиксированного объема пропущенной через нее воды.

Опробование термальных вод с любым газовым фактором следует производить с предварительным охлаждением до нормальной температуры ($20-25^{\circ}\text{C}$). Необходимость последнего объясняется разницей коэффициентов теплового расширения воды и стекла: охлаждение устраняет существенные искажения параметров воды, связанные с закупориванием бутылок в горячем состоянии (рис.12).

4. ТРАНСПОРТИРОВКА И ХРАНЕНИЕ ПРОБ

Многолетний опыт работ в различных геологических и климатических условиях позволяет рекомендовать ряд мер, резко уменьшающих процент брака и повышающих достоверность съемки.

Чаще всего потери отобранных проб происходят при транспортировке, когда бутылки плохо упакованы; в результате они разбиваются или из них выскакивают пробки. В отличие от обычных гидрохимических проб раскупорившаяся даже на короткое время бутылка с отобранной водой для анализа гелия становится непригодной, и проба подлежит ликвидации. Отжиму и выбросу проб способствует обычно возрастающее в бутылке давление, связанное с прогревом исходной холодной воды (начальная температура $5-7^{\circ}\text{C}$) до температуры на поверхности, достигающей в летние месяцы 30°C и выше. Отжим проб в исходных холодных пробах особенно опасен в случаях слабо повышенного газового фактора ($25-40$ мл/л), когда отдельный отбор газовой фазы весьма трудоемок.

Для обеспечения практически полной сохранности проб с учетом указанных уровней газонасыщения и изменений температуры рекомендуется:

а) отбирать на каждом водопункте по две, а в более ответственных случаях по три-четыре бутылки;

б) после наполнения бутылки ставить в ячейки ящика на пробки (перевернутыми вверх дном), закладывать смягчающим удары материалом и закрывать ящик фиксированной крышкой;

в) в перевернутом положении бутылки должны находиться в течение всего периода хранения проб — частично отжатые в таком положении пробки полностью сохраняют герметичность бутылок;

г) ящики с пробками складировать в закрытом, возможно прохладном помещении без резких колебаний температур.

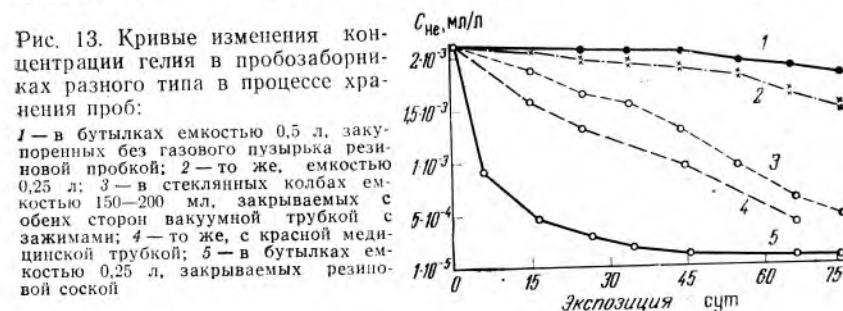
В качестве примера высокого уровня брака на первом этапе освоения метода можно отметить работы в Прибалтике, где при исходной холодной температуре воды (7°C) оказался повышенным газовый фактор ($30-70$ мл/л). Это привело к значительным потерям отобранных проб, достигавшим $50-70\%$. Перечисленные меры и отдельный отбор газа и воды практически устранили брак.

В особо трудных условиях ведения работ (повышенный газовый фактор, длительные перевозки) пробки на горлышке следует укреплять шпагатом или проволокой. В практике работ упакованные таким образом бутылки надежно сохранялись при транспортировке из Приморья до Москвы. В случае дальних транспортировок следует учитывать сроки отправки проб малой скоростью, поскольку имелись случаи их замерзания в пути.

5. УЧЕТ ПОТЕРЬ ГЕЛИЯ ИЗ ПРОБ В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ

Уровень потерь гелия из различного типа пробозаборников (колб и бутылок) изучен опытным путем по нескольким сериям эталонных проб (рис. 13). В колбах, надежно закрытых вакуумными кранами, такие потери минимальны, но из-за высокой стоимости и малой механической прочности этих сосудов они применялись лишь в исследовательских целях. В обычных бутылках потери происходят через резиновую пробку. Колбы, оборудованные на концах резиновой трубкой, имеют максимальный уровень потерь (до 50% в месяц), поэтому они не рекомендуются для работ.

Эксперименты подтвердили опубликованные данные (Корценштейн, 1963) о хорошей сохранности газовых проб, отобранных в бутылки с водным затвором при хранении их в перевернутом состоянии. Такие пробы могут храниться без заметных потерь один-два года. Для проб воды в тех же бутылках должна вводиться поправка, поскольку они имеют в 100 раз меньшую емкость по гелию и соответственно большие удельные



потери. Например, для бутылок 0,5 л поправочный коэффициент к полезному сигналу прибора (C_1) за первый месяц хранения составляет 1,08; за полтора месяца — 1,12; за три месяца — 1,22. Далее кривая потерь принимает экспоненциальную форму.

Поправка на потери обеспечивает удовлетворительную точность воспроизведения исходного сигнала в течение шести месяцев хранения проб, однако следует стремиться к сокращению сроков. В нормальных условиях, особенно при составлении карты гелиеносности района, следует все пробы воды измерять в течение первых 10 сут.

6. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Основным анализатором концентрации гелия в настоящее время является магниторазрядный индикатор ИНГЕМ-1*. Общий вид этого прибора показан на рис. 14, а. Его чувствительным элементом является датчик (рис. 14, б.), представляющий собой миниатюрный ионный насос, герметичная вакуумированная камера которого отделена от внешнего входного баллона трубкой-переходником с тонкой кварцевой мембраной. Исследуемые газы или жидкость вводятся способом свободного потока во внешний баллон. В результате избирательной диффузии через мембрану в магниторазрядный насос (датчик) селективно проникает практически только гелий.

Принцип работы датчика заключается в ионизации молекул и атомов газа и удалении ионов из рабочей камеры путем их эффективного поглощения на катодах. Насос действует в магнитном поле напряженностью 1000 Э, ориентированном вдоль оси анода; анодное напряжение 3,2 кВ поддерживает в камере постоянный газовый разряд. Разрядный ток насоса зависит от давления в камере и служит мерой давления; в данном приборе разрядный ток является мерой содержания гелия в анализируемом веществе.

Благодаря высокоэффективной ионизации газовый разряд сохраняется до очень низких давлений, составляющих при его работе 10^{-9} — 10^{-10} Па. В откачанном до низкого давления насосе повторное зажигание разряда после выключения тока практически невозможно. Для упрощения зажигания повышают давление, для чего датчик снабжен внутренним газовыделяющим источником — накальной вольфрамовой нитью. Если при подаче анодного напряжения разряд не возбуждается, то на короткое время (доли секунды) на нить подается ток.

* Оригинальная конструкция создана группой специалистов ЦНИИ «Электроника» («Измерительная...», 1975).

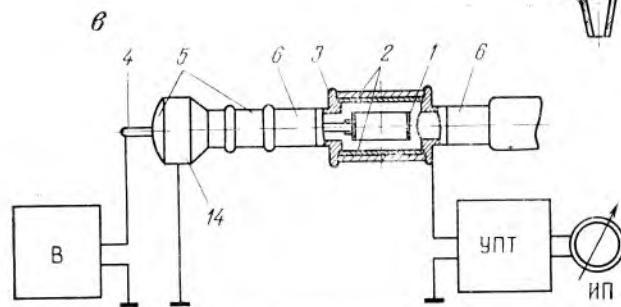
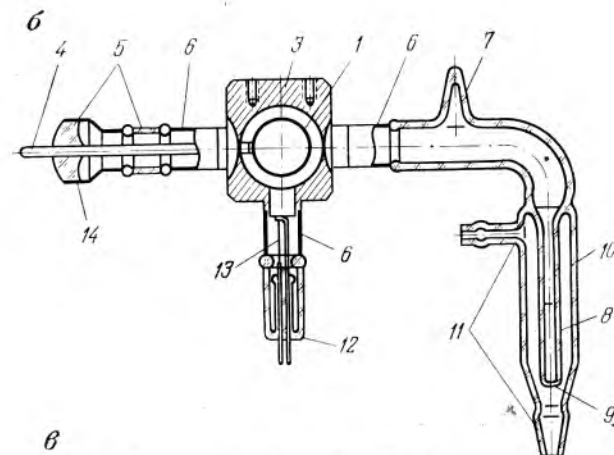
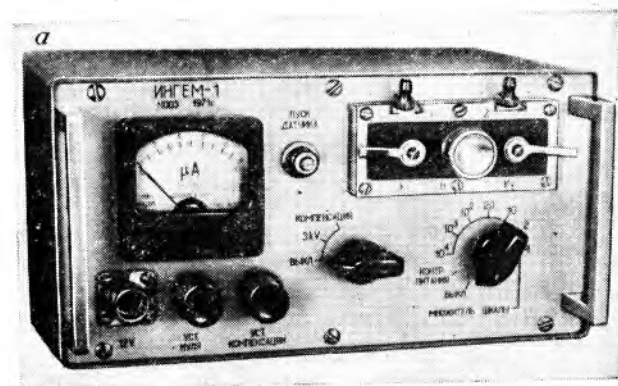


Рис. 14. Общий вид прибора ИНГЕМ-1 (а), конструкция магниторазрядного датчика (б), принципиальная схема включения датчика в измерительную цепь (в).

1 — анод; 2 — катодные пластины; 3 — корпус; 4 — анодный ввод; 5 — стеклянные изоляторы; 6 — высокоизоляционные трубки; 7 — отпаянный штепсель предварительного вакуумирования системы; 8 — кварц-молибденовая стеклянная трубка — переходник; 9 — мембрана из кварцевого стекла; 10 — внешний (напускной) баллон; 11 — входной и выходной штуцеры; 12 — ножка крепления; 13 — вольфрамовая нить пуска датчика; 14 — коваровая втулка; В — высоковольтный выпрямитель; УПТ — усилитель постоянного тока; ИП — измерительный прибор — микроамперметр

Количество выделяющегося при ее нагревании газа достаточно для повышения внутри датчика давления до 10^{-3} Па, при котором зажигание разряда происходит без затруднений. После зажигания выделившийся газ откачивается за 20—30 мин.

Контакт мембраны с атмосферным воздухом обеспечивает поступление в датчик постоянного потока гелия. При равной скорости натекания и быстроты откачки газов внутри датчика устанавливается стабильное давление, которому соответствует некоторое значение фоновое разрядного тока. Введение в напускной баллон газа с повышенной концентрацией гелия (состав газа безразличен) увеличивает поток последнего через кварцевую мембрану, что ведет к повышению давления в камере и разрядного тока датчика. Этот ток после электрометрического усилителя фиксируется микроамперметром. Его изменение пропорционально изменениям парциального давления гелия в баллоне и служит мерой содержания последнего в исследуемом газе. Концентрация гелия в пробе оценивается путем сравнения с концентрацией эталонной смеси.

Диффузия гелия через мембрану происходит не только из газовой среды, но и из жидкости. Это позволяет применять прибор для прямого определения содержания гелия в жидкостях. Эксперименты показали, что разрядный ток в датчике от равновесных по содержанию гелия газовой и водной фаз одинаков. Используя этот эффект, на приборе ИНГЕМ-1 выполняют анализ гелия в водных пробах с чувствительностью, многократно превышающей максимально возможную, которую можно достигнуть на системах с вакуумной дегазацией.

Абсолютная чувствительность датчика определяется геометрическими размерами (площадью, толщиной) и температурой кварцевой мембраны. Экспериментально подобраны размеры мембраны: площадь рабочей поверхности $0,1 \text{ см}^2$, толщина 10 мкм . При 20°C такие мембраны обеспечивают чувствительность датчиков к парциальному давлению гелия до $3,7 \times 10^{-12} \text{ А/Па}$.

Влияние температуры анализируемого вещества на метрические характеристики датчика может быть учтено введением поправок в результаты измерений. Однако для достижения максимальной точности анализа лучше с помощью термостатирования обеспечивать одинаковую температуру для исследуемого вещества и прибора.

Инерционность датчика определяется временем проникновения гелия через мембрану, которое зависит от ее толщины. При 20°C и принятой толщине мембраны это время не превышает 30 с. Кроме гелия практически проникающими через кварцевое стекло газами при нормальной температуре являются водород и неон. Однако проницаемость кварцевого стекла для водорода и неона ниже, чем для гелия, примерно в 10^3 раз. Прямая гра-

дуировка датчиков по чистому водороду при атмосферном давлении и нормальной температуре подтвердила указанные диффузионные параметры (едва заметное увеличение разрядного тока наблюдалось только через 30 мин). Таким образом, присутствие в анализируемом газе водорода практически не влияет на точность определения содержания гелия, поскольку полное время анализа пробы не превышает первых минут.

Техническая характеристика прибора ИНГЕМ-1. На верхней панели прибора смонтированы устройства для подключения и управления, измерительный стрелочный микроамперметр, а также входной и выходной штуцеры для подачи и вывода исследуемой пробы.

Внутри корпуса размещены датчик и основные блоки: высоковольтный выпрямитель для питания датчика, усилитель постоянного тока, стабилизатор и преобразователь напряжения, выпрямители для питания усилителя и блока компенсации.

Высоковольтный выпрямитель выполнен по схеме умножения напряжения, обеспечивающей на аноде датчика напряжение $+3,2 \text{ кВ}$. Накал газовыделяющей нити датчика для зажигания разряда осуществляется от внешнего источника питания (12 В). Балластное сопротивление в цепи накала ограничивает пусковой ток в пределах $200\text{—}250 \text{ мА}$.

Усиление разрядного тока датчика осуществляется транзисторным преобразователем, во входном каскаде которого используется электрометрическая лампа ЭМ-7. Сигнал на выходе усилителя измеряется микроамперметром типа М-4205 (10 мкА). Применение в усилителе двух входных переключаемых с помощью реле сопротивлений (10 ГОм и 100 МОм) обеспечивает возможность измерения разрядного тока датчика от $1 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ при отклонении стрелки измерительного прибора на всю шкалу. Диапазон измерения токов распределен по семи шкалам с кратностью 1, 2, 10, 20, 100, 1000 и 10 000.

Дрейф нуля усилителя не превышает 10 мВ/ч при флуктуациях не более $\pm 2 \text{ мВ}$.

Питание усилителя постоянного тока, блока компенсации и высоковольтного выпрямителя осуществляется от двух преобразователей напряжения, работающих на частоте 5 кГц . Стабилизатор напряжения обеспечивает нормальную работу прибора при питании от внешнего источника постоянного тока напряжением от $10,2$ до $14,4 \text{ В}$.

Внешние габариты прибора $240 \times 143 \times 210 \text{ мм}$; масса $4,5 \text{ кг}$.

Систематическая градуировка по газовым и водным эталонам, производившаяся в процессе испытаний и опытной эксплуатации нескольких приборов ИНГЕМ-1, показала, что их чувствительность со временем (в условиях нормальной влажности) практически не изменяется. При повышенной влажности ухудшается стабильность метрических параметров прибора, что требует более частого его эталонирования.

Прибор ИНГЕМ-1 не имеет собственной калибровки. Поэтому в условиях перепадов атмосферного и высотного давления, температуры и влажности требуется надежный внешний контроль.

Удобным естественным репером является концентрация гелия в атмосферном воздухе ($5 \cdot 10^{-5}$ об. % или 0,5 Па) и в равновесной ему воде ($5 \cdot 10^{-5}$ мл/л). Следует отметить, однако, что параметры этого репера не остаются постоянными при изменении высотных отметок.

Другим репером служит приборный нуль отсчета, создаваемый газом-наполнителем, практически не содержащим гелия. Таким наиболее удобным наполнителем является углекислый газ, получаемый химическим путем в аппаратах Киппа при реакции разбавленной соляной кислоты с двууглекислым натрием (пищевой содой). Газ вводится во внешнюю камеру прибора в режиме потока и вытесняет атмосферный воздух; в рабочей камере прибора в это время «тлеет» шумовой разряд.

Периодическая регистрация приборного нуля весьма полезна, поскольку она позволяет измерять приращение тока гелия, содержащегося в атмосферном воздухе, т. е. контролировать интервал от условного нуля до 0,5 Па. Такая калибровка прибора служит уточнению цены деления на уровне содержания гелия в воздухе.

Более сложным оказалось получение длительно действующих эталонов со стабильной концентрацией гелия, превышающей его содержание в атмосферном воздухе. Из всех исследованных систем предпочтительным оказалось эталонирование, основанное на изготовлении газо-гелиевой смеси, накачанной под давлением до 10^7 Па в стальные баллоны емкостью от 5 до 40 л. Лучшие по качеству наполнители — воздух и азот. Достаточно точная дозировка гелия с погрешностью не более 5% от заданной величины может быть достигнута при нагнетании газа в баллон непосредственно на компрессорной установке: дозированное при атмосферном давлении количество гелия подается на всасывающий патрубок компрессора. Затем полученная концентрация уточняется анализом на приборе в сравнении с маркированным эталоном.

Для нормального функционирования аналитической лаборатории требуется изготовление четырех эталонов гелия со значениями, кратными 5, 20, 200 и 2000 концентраций гелия в атмосферном воздухе или 2,5; 10; 100 и 1000 Па.

Важным преимуществом газовых эталонов большого давления является возможность длительного пользования (в течение нескольких лет), что позволяет надежно контролировать результаты съемки во времени. Таким образом, можно достичь

удовлетворительной увязки результатов съемки, выполненной различными организациями.

Эталонирование приборов производится через редукторы, позволяющие получать на выходе слабую струю газа (3—5 мл/с) с перепадом давления на входе и выходе в режиме потока не более 10^3 Па. Такой способ эталонирования исключает возможность механического разрушения кварцевой мембраны датчика, сводит к нулю погрешности за счет искусственного увеличения упругости гелия во входной камере и обеспечивает минимальный расход газа.

Регулирование режима потока производится до подключения к прибору резиновой трубки, надетой на выходной штуцер редуктора. Открытие вентиля редуктора с подключенным прибором, так же как его дополнительное регулирование в процессе эталонирования, недопустимы в связи с возможным возникновением динамических толчков.

Эталонирование производится указанным комплектом смесей в начале и в конце работы. Дополнительное эталонирование применяется в процессе измерения для сопоставления сигналов отдельных наиболее важных проб. Проверка цены деления прибора необходима также в случае возникновения у оператора каких-либо сомнений в отношении изменения режима его работы.

Изучение метрических характеристик прибора ИНГЕМ-1 показало, что он фиксирует только парциальное давление гелия в пробе, подаваемой во входную камеру датчика. Как отмечено выше, состав ее фазы при этом роли не играет, поскольку атомное разбавление гелия на его упругости не сказывается. В соответствии с этой важной особенностью на достаточно чувствительных экземплярах прибора ИНГЕМ-1 удалось экспериментально подтвердить изменение сигнала содержания гелия в атмосферном воздухе в зависимости от барометрического давления. Например, если при давлении P_1 показание прибора C_1 , то с уменьшением давления оно изменяется пропорционально отношению

$$C_1 = C_2 \frac{P_2}{P_1} \quad (10)$$

В то же время объемная концентрация гелия в газе остается постоянной, независимой от давления: отношение объема гелия к сумме объемов компонентов-наполнителей (азота и кислорода) при разрежении газа с высотой не изменяется и составляет исходные $5 \cdot 10^{-4}$ об. %.

Так нашел объяснение эффект «отрицательного» фонового значения гелия в пробах газа и воды, отобранных в высокогорных условиях и измеренных, в частности, в Москве. Напротив, относительно Москвы несколько завышенными казались фоно-

вые значения гелия в пробах воздуха и воды, отобранных на уровне моря (в Ленинграде и Таллине). Такие прецизионные измерения содержания гелия возможны только на хорошо налаженных приборах с минимальными значениями флуктуации и дрейфа. Вторым необходимым условием подобных измерений является надежное эталонирование.

На основе точного эталонирования стало возможным применение бутылок с водными эталонами разового пользования. В этом случае серии проб воды (по 10—12 бутылок) с определенным содержанием гелия, точно измеренным в сравнении с газовым эталоном, брали в маршрут со сроком использования до 10 дней. Более длительное применение таких эталонов нежелательно в связи с потерями гелия из бутылок.

Комбинированная система эталонирования приборов ИНГЕМ-1 позволяет обеспечить весьма высокий уровень гелиевой съемки при любых видах работ во всем диапазоне встречаемых концентраций.

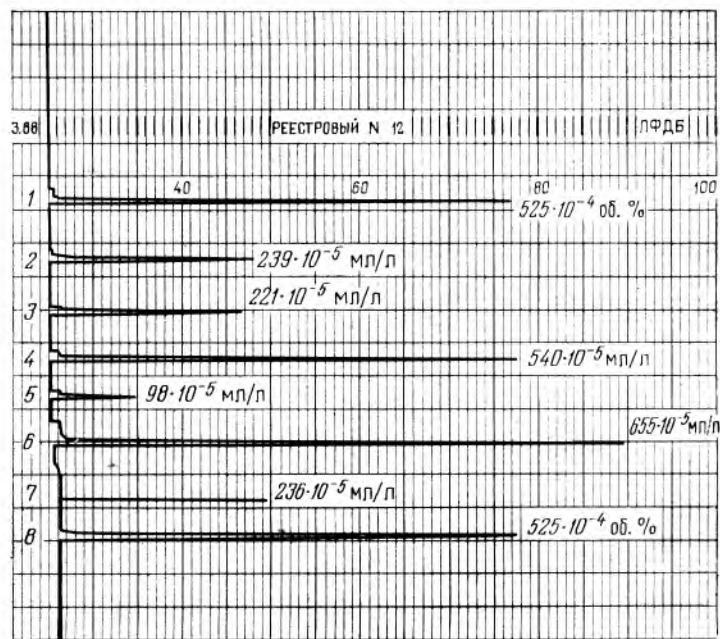


Рис. 15. Запись измерения концентраций гелия прибором ИНГЕМ-1 с самописцем ЭПП-09.

1 и 8 — газовый эталон с содержанием гелия 0,0525 об. %; 2 и 7 — фабрика «Красный Октябрь», скв. 4; 3 — пос. Видное, насосная станция 4, скв. 3; 4 — фирма «Русский квас», скв. минеральная 2; 5 — пос. Видное, насосная станция 1, скв. 3; 6 — фирма «Русский квас», скв. минеральная 1. Скорость движения ленты 180 мм/ч; дрейф нуля за 47 мин записи — 3 мм; $I_{ср} = 140$ мм; абсолютная ошибка $\sigma_{абс} = \pm 0,8$ мм, относительная ошибка $\sigma_{отн} = 0,57\%$.

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГЕЛИЯ В СИСТЕМЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛА

Разработанная аппаратура для анализа гелия в воде и газе в режиме потока позволяет осуществить прямую запись сигнала на стрелочных самописцах, а также в цифровых и других запоминающих устройствах. С этой целью на вход прибора подается струя газа или воды указанной выше интенсивности под давлением не более 10^3 Па. Для сохранения уровня высококачественной регистрации используются некоторые дополнительные приемы:

— для устранения влияния разности температур подаваемой фазы и окружающей среды производится термостатирование воды;

— в случае опробования сильногазонасыщенной воды применяется ее разделение на газовую и жидкую фазы с отдельным фиксированием сигнала;

— периодическое переключение и ввод газового эталона обеспечивают сопоставление сигналов проба — эталон.

Термостатирование наиболее просто и достаточно эффективно выполняется с помощью водяного теплообменника, в котором подаваемая на вход фаза предварительно пропускается через металлическую спиральную трубку, находящуюся в емкости с проточной водой (см. рис. 12).

Самописец ЭПП-09 со шкалой 2 мВ подключается для непрерывной регистрации сигнала на вход УПТ прибора ИНГЕМ-1. В последнее время ЭПП-09 заменен самописцем КСП-4 со шкалой 1 мВ. Примеры записи по ряду проб и контрольному эталону приведены на рис. 15.

На заключительных этапах гелиметрических исследований у исполнителей обычно возникают затруднения с выбором способов изображения полученных данных. Объясняется это как сложностью структуры поля гелия, так и трудностями расчета полных (истинных) концентраций для реальных подземных условий. Например, выражаемая обычно для подземного газа концентрация в объемных процентах практически не отражает фактический уровень гелиенасыщения в пластовых условиях, откуда этот газ взят (Савченко, 1977).

Для оценки истинной концентрации гелия в поровом пространстве пласта необходимо привести результаты анализа газовой фазы с учетом ее количества к пластовым условиям и просуммировать этот показатель с упругостью гелия в воде. Рассмотрим основные элементы обработки результатов подробнее.

1. РАСЧЕТ ПОЛНОЙ ГЕЛИЕНАСЫЩЕННОСТИ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА ПОДЗЕМНОЙ СРЕДЫ

Оценка требуемых параметров возможна только при условии знания ряда характеристик, получаемых еще в процессе отбора проб. Ниже приведены формуляры для документации проб воды и газовой фазы.

Формуляр для документации пробы воды

1. Организация — исполнитель работ.
2. Номер пробы.
3. Дата отбора — число, месяц, год.
4. Местонахождение водопункта — полная привязка: республика, район, населенный пункт, площадь и пр.
5. Тип водопункта со всеми данными — колодец (глубина до зеркала, до дна), родник, скважина (тип, назначение).
6. Абсолютная отметка над уровнем моря — метры.
7. Оборудование скважины — глубина, интервал обсадки, открытого ствола или фильтра.
8. Положение воды в скважине — глубина зеркала (м) или величина напора (м).
9. Способ подачи воды из скважины — самоизлив, штанговый насос, погружной электронасос, характер выхода воды.
10. Способ наполнения бутылок — простое заполнение, сифоном через трубку, газоотделителем, водоносом и пр.
11. Температура воды.
12. Температура воздуха при отборе.
13. Газовый фактор — количество газа в воде ($\text{см}^3/\text{л}$).
14. Минерализация воды — граммы на литр.

15. Вкус воды — пресная, соленая, горько-соленая, углекислая, сероводородная и др.

16. Фамилия исполнителя и подпись.

Формуляр для документации пробы газа

1. Организация — исполнитель работ.
2. Номер пробы.
3. Дата отбора — число, месяц, год.
4. Местонахождение водопункта — полная привязка: республика, район, населенный пункт, площадь и пр.
5. Тип газовыделения с полной характеристикой выхода газа — родник, скважина, дегазация воды, сухой газ, газоотделитель и пр.
6. Погодные условия при отборе пробы — температура, ветер, осадки.
7. Дебит газа — оценен визуально, с помощью газоотделителя, газомером ($\text{см}^3/\text{л}$; $\text{л}/\text{мин}$).
8. Характеристика газа — запас, вкус, известный или вероятный тип.
9. Абсолютная отметка над уровнем моря — метры.
10. Способ наполнения пробозаборника — замещение воды, вакуумирование, прокачка со сменной объема.
11. Фамилия исполнителя и подпись.

В табл. 15 даны форма журнала анализа газовых проб и пример записи одного из анализов, в табл. 16 — то же, для воды.

Затем последовательно изложен ход расчета полной концентрации гелия с привлечением необходимых дополнительных элементов — введения поправки в анализ воды на объем находящегося в бутылке газового пузырька (берется с графиков рис. 16) и оценки растворимости гелия в воде при температуре и минерализации, характерных для сферы опробования (рис. 17).

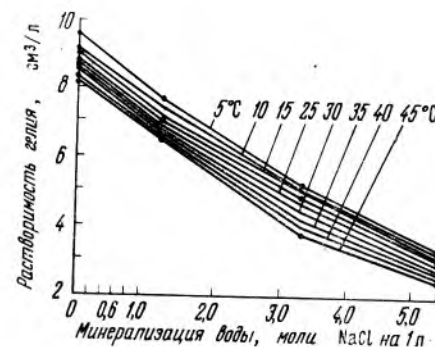
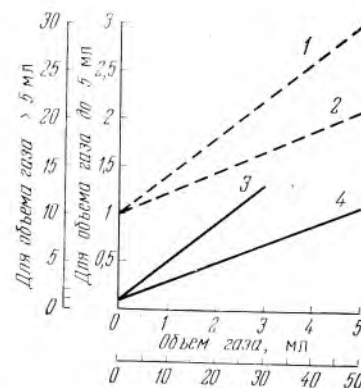


Рис. 16. Графики для определения поправочного коэффициента K_1 на объем газового пузырька в бутылках емкостью 0,25 и 0,5 л

Рис. 17. Кривые растворимости гелия в водах различной минерализации при температуре от 5 до 45°C и давлении 10^5 Па (по Намиоту и Бондаревой, 1963)

Форма записи и пример анализа пробы газа на приборе ИНГЕМ-1

Таблица 15

1. Наименование организации, лаборатории, номер журнала

2. Дата начала; дата окончания

Номер анализа	Номер проб, место отбора, температура и минерализация воды	Показания прибора n			Цена одного деления $c = \frac{a \cdot 10^{-5}}{1 \text{ дел.}}$ об. %	Концентрация гелия в пробе C_{He} , об. % $C_{\text{He}} = \frac{a \cdot 10^{-5}}{1 \text{ дел.}}$ об. %
		I_0	I_1	ΔI		

Анализ 1/X 1976 г.; прибор № 003; оператор С. А. Макаренков

101	64/3-г, газ родника 12, отбор 17/VI 1976 г., $t = +40^\circ\text{C}$; $M = 30 \text{ г/л}$	6	124	118	$3 \cdot 10^{-5}$ об. %	$118 \cdot 3 \cdot 10^{-5} = 3,54 \cdot 10^{-3}$
102	Дубль	6,5	127	120,5	$3 \cdot 10^{-5}$ об. %	$120,5 \cdot 3 \cdot 10^{-5} = 3,65 \cdot 10^{-3}$
					Среднее	$3,6 \cdot 10^{-3}$

Примечание. n — число делений; I_0 , I_1 — соответственно фоновый ток и ток от пробы; ΔI — приращение тока; $a \cdot 10^{-5}$ об. % — определена ранее измерением эталона.

Форма записи и пример анализа пробы воды на приборе ИНГЕМ-1

Таблица 16

1. Наименование организации, лаборатории, номер журнала

2. Дата начала; дата окончания

Номер анализа	Номер проб, место и дата отбора, температура, минерализация воды и объем пробы	Показания прибора n			Цена одного деления $c = \frac{a \cdot 10^{-6}}{1 \text{ дел.}}$ мл/л	Измеренная концентрация гелия C_1 , мл/л $C_1 = \frac{a \cdot 10^{-6}}{1 \text{ дел.}}$	Объем газа в бутылке, мл	Концентрация гелия в пробе	
		I_0	I_1	ΔI				с учетом газового пузыря $C_2 = C_1 K_1$	с учетом срока хранения пробы $C_3 = C_2 K_2$
103	64/3-в, вода из родника 12, $t = +40^\circ\text{C}$, $M = 30 \text{ г/л}$, объем пробы 0,25 л	6	187	181	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6} \cdot 181 = 5,43 \cdot 10^{-4}$	1,5	$8,68 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$
104	Дубль	7	171	164	$3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6} \cdot 164 = 4,92 \cdot 10^{-4}$	2	$8,86 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$
							Среднее		$1,21 \cdot 10^{-3}$

Примечание. Индексы те же, что в табл. 15.

Пример 1. В роднике 12 (см. табл. 15) газовый фактор равен 180 мл/л при температуре воды +40°C и минерализации 30 г/л.

1. Рассчитаем количество гелия в газовой фазе Q_g , в которой объемная концентрация гелия определена данными анализа (см. табл. 15):

$$Q_g = \frac{180 \text{ мл/л} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ об. \%}}{100\%} = 6,48 \cdot 10^{-3} \text{ мл/л.}$$

2. Рассчитаем количество гелия в 1 л воды Q_v по данным анализа (см. табл. 16) с учетом поправочных коэффициентов на газовый пузырек в бутылке K_1 и на срок хранения проб K_2 . Значение K_1 берем из графика рис. 16, что для бутылки объемом 0,25 л (полный объем 280 мл) при газовых пузырьках 1,5 и 2 мл составляет 1,6 и 1,8. Отсюда $C_2 = 5,43 \cdot 10^{-4}$ мл/л, $1,6 = 8,68 \cdot 10^{-4}$ и $8,86 \cdot 10^{-4}$ — для дубля.

При сроке хранения 3,5 мес и объеме 0,28 л $K_2 = 1,39$. Отсюда $C_3 = 8,68 \cdot 10^{-4} \cdot 1,39 = 1,20 \cdot 10^{-3}$ мл/л и $1,23 \cdot 10^{-3}$ — для дубля. Среднее по двум измерениям составляет $1,21 \cdot 10^{-3}$ мл/л, что соответствует концентрации гелия в воде на поверхности исследуемого водопункта.

3. Для определения полной концентрации просуммируем данные анализа в газе и воде:

$$Q = Q_g + Q_v = (6,48 + 1,21) \cdot 10^{-3} \text{ мл/л} = 7,69 \cdot 10^{-3} \text{ мл/л.}$$

4. Покажем преимущества выражения концентрации гелия в упругости (Па). Для получения этой величины необходимо знать растворимость гелия при указанных для водопункта температуре, минерализации, атмосферном давлении. Такую цифру определим из графика рис. 17, где для 40°C и минерализации 30 г/л (примерно 0,5 моля NaCl) при нормальном давлении растворимость составит 7,7 мл/л. Отсюда упругость составит:

$$P_{\text{He}} = \frac{7,69 \cdot 10^{-3} \text{ мл/л} \cdot 10^5 \text{ Па}}{7,7 \text{ мл/л}} = 99 \text{ Па.}$$

Пример 2. В скважине глубиной 2040 м газовый фактор составляет 640 мл/л, минерализация 260 г/л, температура 45°C; измеренное содержание гелия в газовой фазе $C_g = 3,1$ об. %, в воде — $Q_v = 3,3 \cdot 10^{-2}$ мл/л. Требуется найти упругость гелия для пластовых условий на глубине 2040 м.

1. Количество гелия в газовой фазе составит:

$$\frac{640 \text{ мл/л} \cdot 3,1 \text{ об. \%}}{100\%} = 19,84 \text{ мл/л.}$$

2. Общее количество гелия в газе и воде:

$$19,84 + 0,033 = 19,873 \text{ мл/л.}$$

3. При растворимости 3 мл/л для заданных значений минерализации, температуры и давления упругость составит:

$$\frac{19,87 \text{ мл/л} \cdot 10^5 \text{ Па}}{3 \text{ мл/л}} = 6,62 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

2. ВЫБОР УНИВЕРСАЛЬНОГО ВЫРАЖЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛЯ ГЕЛИЯ

Известно повсеместное распространение гелия на Земле, в атмосфере и космосе. Например, обнаружена гелиевая атмосфера Меркурия; высокие концентрации гелия установлены в лунном грунте. Желательно в этой связи единое выражение для исследуемых пространств общего поля гелия. Препятствием здесь явля-

ется многовариантность способов выражения его концентраций, часть из которых противоречит даже физическому смыслу. Так, в ряде публикаций сохраняется выражение концентрации гелия для воды в объемных процентах. Это неверно, поскольку гелий в воде растворен истинно и объема практически не занимает.

Таблица 17

Применяемые единицы концентраций гелия в различных вмещающих средах (фазах)

Фаза	Размерность			
	об. %	мл/л	см ³ /г	Па
Газ	1*	—	—	1000
Вода	—	0,09	—	1000
Порода и минералы	—	—	0,1	—

Примечание. Цифры приведены в качестве примера.

В табл. 17 показаны основные формы выражения концентраций гелия для всех сред. Из них для газа и воды наиболее удобно выражение в упругости, или паскалях. Применение такой формы возможно, например, для построения разреза вертикального поля гелия литосферы, гидросферы и атмосферы, в том числе в высокогорных условиях, где упругость гелия отличается от упругости на уровне моря. На рис. 18 приведен подобный разрез, наглядно показывающий распределение потоков и характер поля гелия.

Вместе с тем часто требуется построение трехфазных систем. Результаты изучения твердой фазы (керны и штуфов) в равновесии ее с газом и водой (раздел 3 главы III) позволяют найти способы выражения концентраций гелия в единицах упругости и для этой фазы. Способ пересчета следующий:

а) известными методами определяют количество гелия в единице массы твердой фазы (см³/г);

б) зная плотность породы (минерала), вычисляют количество гелия в единице ее объема (см³/см³);

в) исходя из отмеченных выше условий фазовых равновесий гелия, приравнивают это количество к константам его растворимости в воде с минерализацией и температурой, характерными для исследуемой среды.

Отсюда формула для расчета упругости гелия в твердой фазе примет вид

$$P_{\text{He}} = \frac{Q_{\text{He}} \text{ см}^3 \cdot \text{см}^3 \cdot 10^5 \text{ Па}}{R_{\text{He}} \text{ см}^3 \cdot \text{см}^3}, \quad (11)$$

где R_{He} — коэффициент растворимости гелия.

Не все формы гелия могут создавать давление. Поэтому рассчитанное указанным способом давление больше реального и

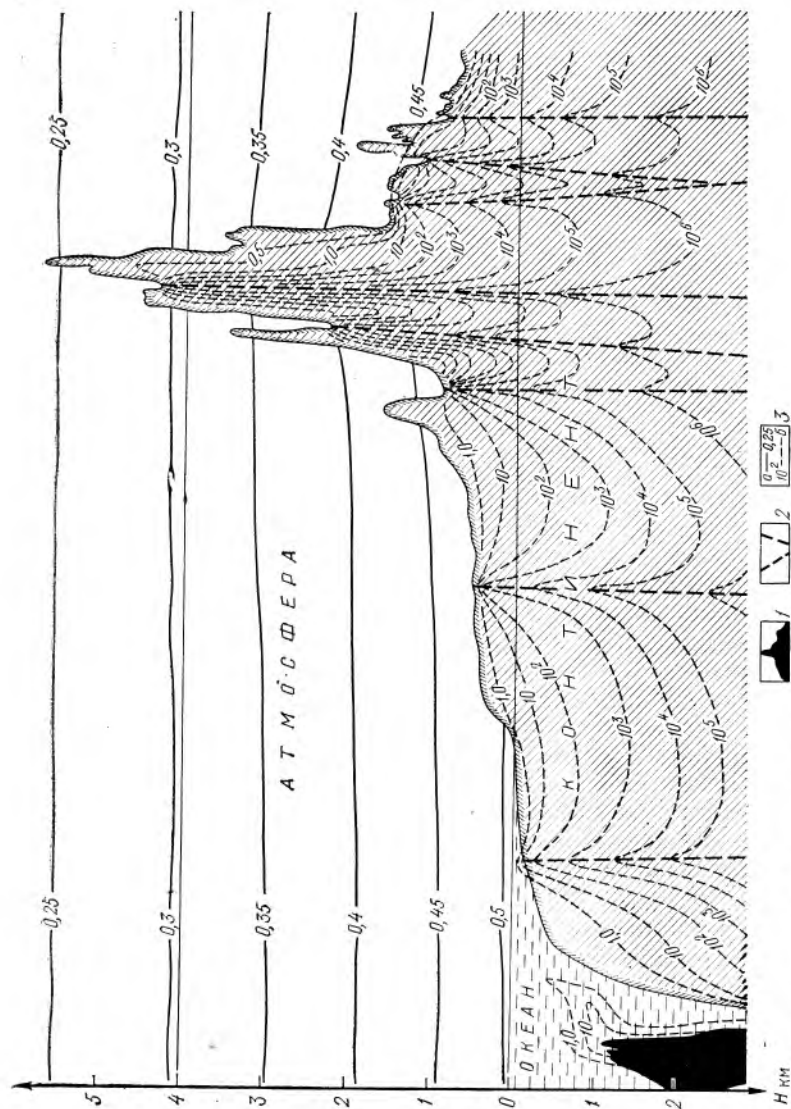


Рис. 18. Вертикальный разрез поля гелия.

1 — океанический рифт; 2 — разломы; 3 — изолинии концентрации гелия (Па); 4 — в атмосфере; 5 — в гидросфере

его следует называть условным. Например, для образца лунного грунта, отобранного станцией «Луна-20» с глубины первых десятков сантиметров (Задорожный, 1976), установлена концентрация гелия $0,1 \text{ см}^3/\text{г}$, что при плотности ≈ 1 дает $1,1 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Очевидно, в действительности давление значительно ниже и большая часть этого гелия в лунных условиях находится в связанном состоянии. Иначе гелий немедленно вырвался бы в вакуум окололунного пространства. То же относится к земным радиоактивным минералам, в которых, по оценке П. М. Харлея (1956), давление достигает 20 МПа (по нашему расчету, условное давление можно оценить в сотни мегапаскалей). Такое давление на поверхности земли разорвало бы радиоактивный минерал. Однако этого не происходит, поскольку значительная часть гелия находится в связанном состоянии.

Таким образом, в рассматриваемом случае давление является условным, обозначим его через P' . С этой оговоркой представляется единственная возможность сопоставления интенсивности гелиенасыщения вмещающей трехкомпонентной среды, в том числе для таких объектов, как космический вакуум, где давление гелия стремится к нулю.

По двум другим фазам вещества способ расчета упругости был показан в рассмотренных выше примерах; общая формула его:

для газовой фазы

$$P_{\text{He}} = \frac{C_{\text{He}} \text{ об. \%} \cdot 10^6 \text{ Па}}{100 \text{ об. \%}}; \quad (12)$$

для воды

$$P_{\text{He}} = \frac{C_{\text{He}} \text{ мл/л} \cdot 10^6 \text{ Па}}{R_{\text{He}} \text{ мл/л}}, \quad (13)$$

где R_{He} — коэффициент растворимости гелия для воды, зависящий от ее температуры, минерализации и давления.

3. СОСТАВЛЕНИЕ

КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Опыт гелиметрических исследований показывает целесообразность развития работ от рекогносцировочных, региональных и мелкомасштабных к более крупномасштабным. В ходе таких работ учитываются все особенности строения района — тектонические, гидрогеологические, геоморфологические и др.

Предварительную обработку данных съемки полезно проводить, начиная с рекогносцировочного этапа. Тогда увеличение информации, связанное с уплотнением съемочной сети и интерпретацией получаемых результатов, будет способствовать целенаправленному ведению работ.

По данным опробования составляется карта фактического материала, куда выносятся точки гелиевой съемки с принятой для района системой нумерации; одновременно строится карта на-

блюденных концентраций с результатами анализа проб. К нумерации и составлению первичных материалов следует отнестись очень внимательно, поскольку в отборе проб обычно участвует много исполнителей; важно, чтобы номера проб не повторялись и, кроме того, отражали вид опробования, характер водоносного комплекса и др. (см. табл. 15 и 16).

Следует обратить внимание исполнителей на очевидные преимущества построения поля гелия в изолиниях его интенсивности. Это подтверждает известный общий вывод о более выразительном изображении любых гидрохимических полей в изоконцентрациях по сравнению с практикуемыми до сих пор (особенно в гидрогеологии) способами выражения в точках или кружках с секторами значимости процентных содержаний компонентов.

Перечислим наиболее часто применяемые графические построения:

- 1) схема наблюдаемого поля гелия начального этапа работ;
- 2) карта наблюдаемого поля гелия, составляемая с использованием статистической обработки материала и с учетом коэффициента контрастности; 3) карта «сглаженной» поверхности.

Все три варианта строятся вручную. Кроме того, отработано автоматизированное построение карт в изолиниях с проведением тренд-анализа на ЭВМ. Приведем примеры ручного и машинного построения.

Варианты ручного построения проще на ранних этапах работ при небольшом объеме фактических материалов. При этом не следует избегать построения карт по данным редкой рекогносцировочной сети опробования. Специфика распределения гелия такова, что предварительное рассмотрение материала уже дает информацию об основных особенностях геологического строения района.

В качестве примера на рис. 19 приведена схема регионально-го поля гелия Северного Казахстана, построенная в 1967 г. на начальном этапе работ по редкой сети (средняя плотность съемки — одна точка на 250—300 км²). На этой схеме отразились генерализованные тектонические структуры Кокчетавской глыбы — крупные непроницаемые жесткие блоки, разделенные системами глубинных разломов.

В ходе изучения поля гелия района и увеличения числа точек наблюдений последовательно изменяется характер картографического материала — от схем до кондиционных карт со статистической оценкой градаций поля. При этом выявляются структуры более мелкого порядка.

На рис. 20 показан второй вариант схемы поля гелия района Северного Казахстана, построенной в 1978 г. В контуре расширенной площади съемки аномалиями достаточно четко отражены крупные структурные узлы. Кроме выявленных ранее систем разломов установлены крупные нарушения диагональной и ортогональной ориентации.

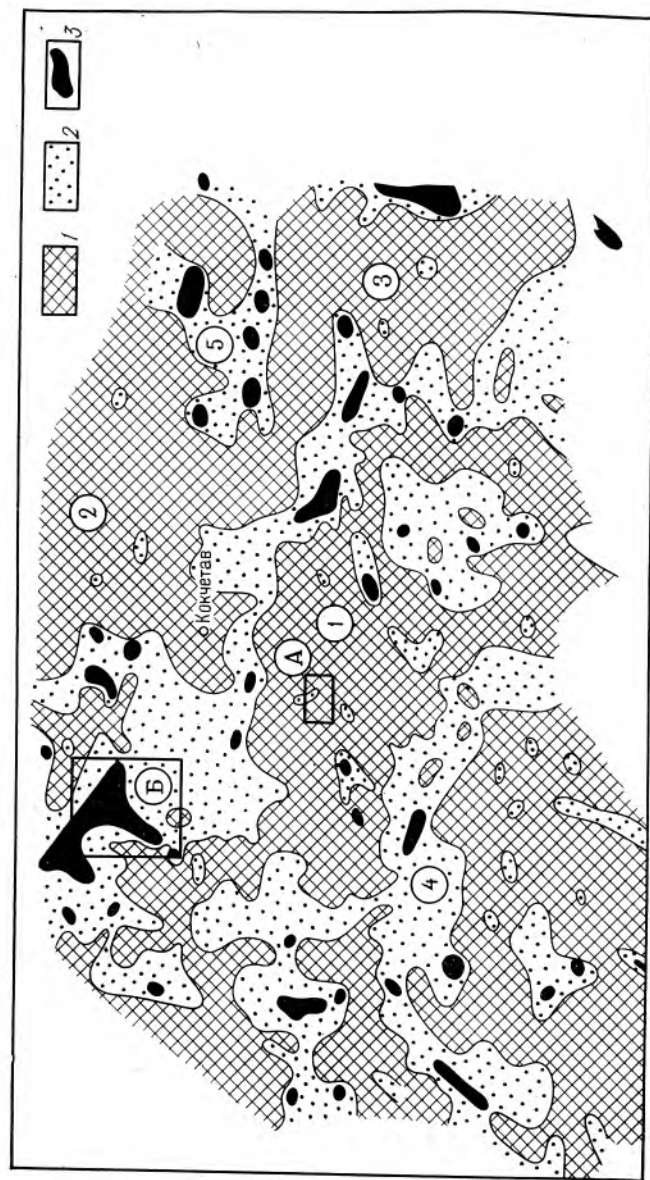


Рис. 19. Схема поля гелия (Северный Казахстан), построенная в 1967 г. Концентрация гелия в об. %: 1 — < 5·10⁻³; 2 — 5·10⁻³ — 5·10⁻²; 3 — > 5·10⁻². А, Б — участки детальных исследований, показанные соответственно на рис. 22 и 23. Граничные массивы (цифры в кружках): 1 — Зерендинский, 2 — Алабытинский, 3 — Кырккудукский. Системы глубинных разломов: 4 — Аккан-Бурлукская, 5 — Атасор-Ерментауская

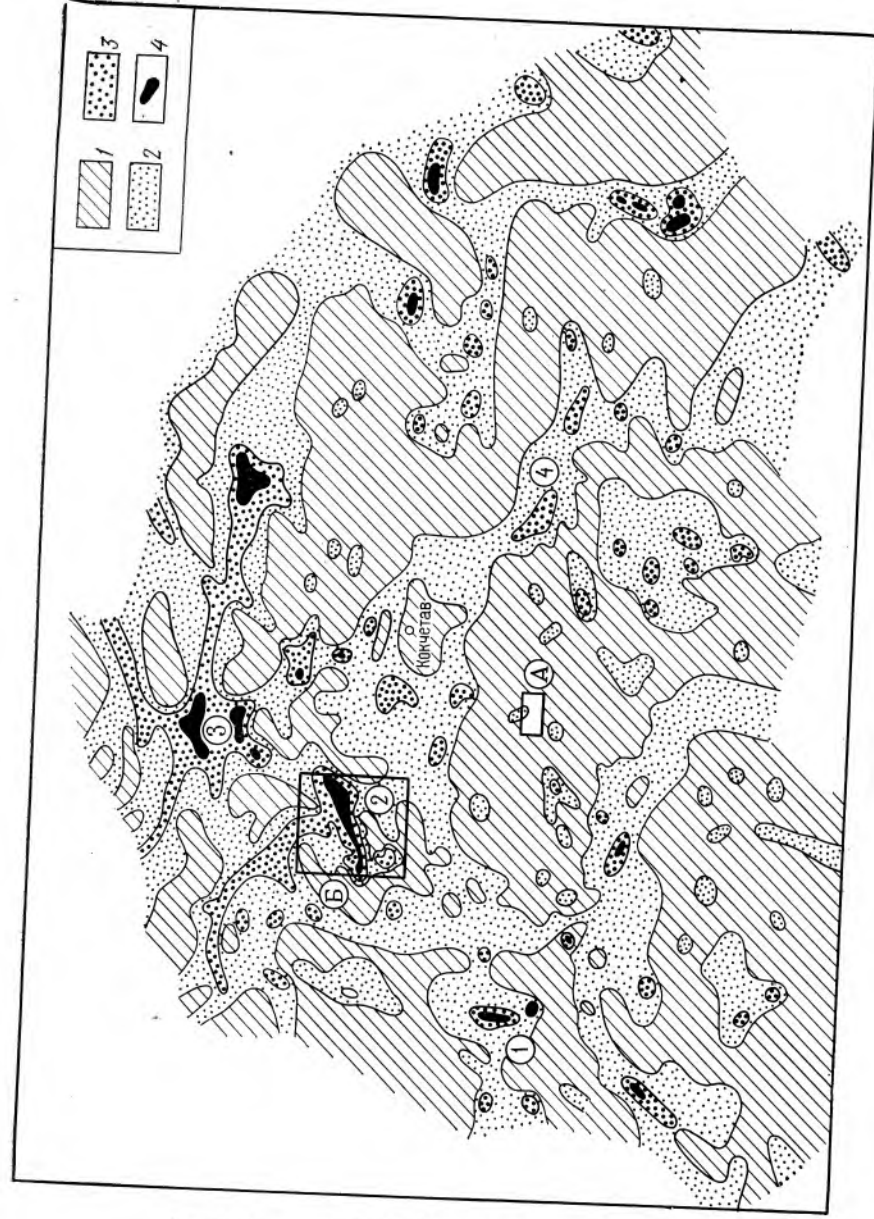


Рис. 20. Схема поля ге-
лия с до-
полнением и
уточнением
съемки
1968 г.
Концентрация
гелия в об. %:
1 — $< 5 \cdot 10^{-3}$;
2 — $5 \cdot 10^{-3}$ —
 $5 \cdot 10^{-2}$; 3 —
 $5 \cdot 10^{-2}$ — $5 \times$
 $> 0,5$.
Структурные
узлы (цифры
в кружках):
1 — Сары-
дырский, 2 —
Летаевский,
3 — Орзано-
горский, 4 —
Шучинский

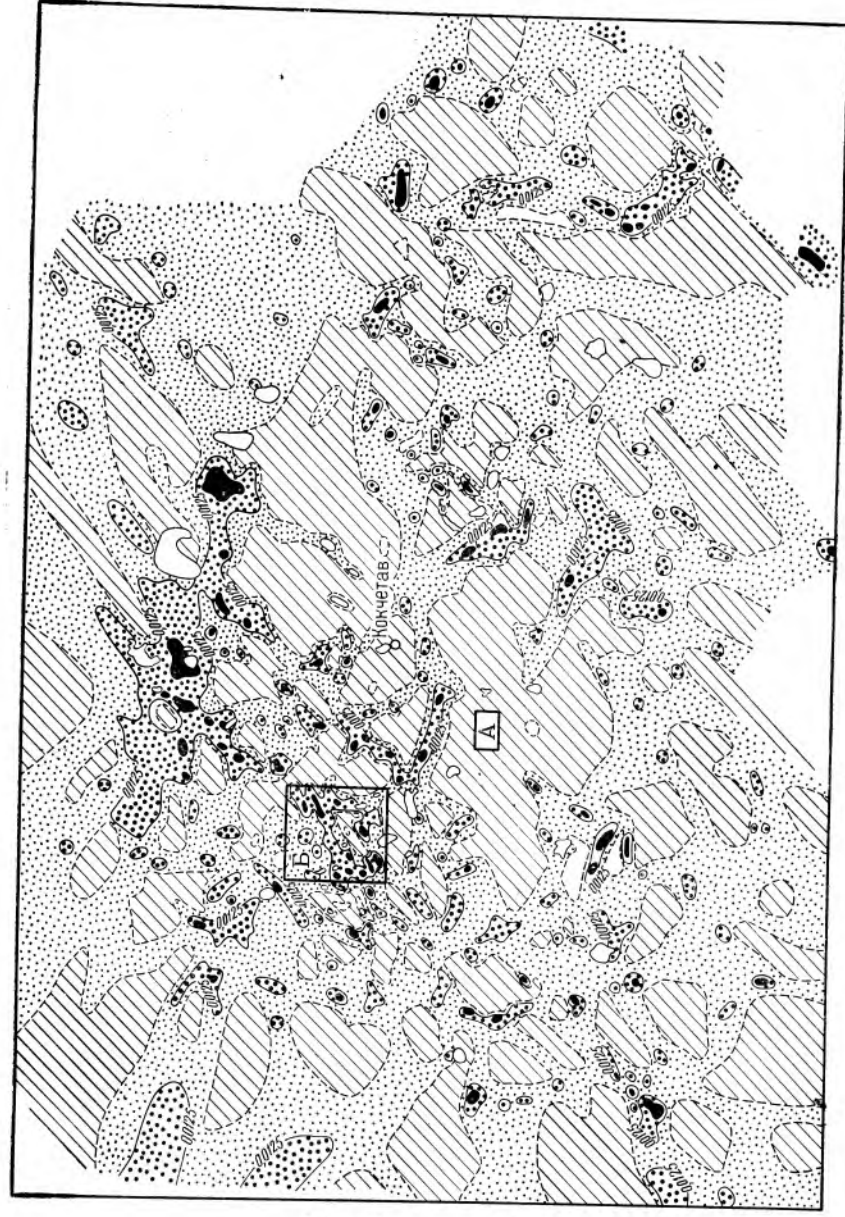


Рис. 21. Схе-
ма поля ге-
лия с до-
полнением и
уточнением
съемки
1969—
1970 гг.
См. обозначе-
ния на рис.
20

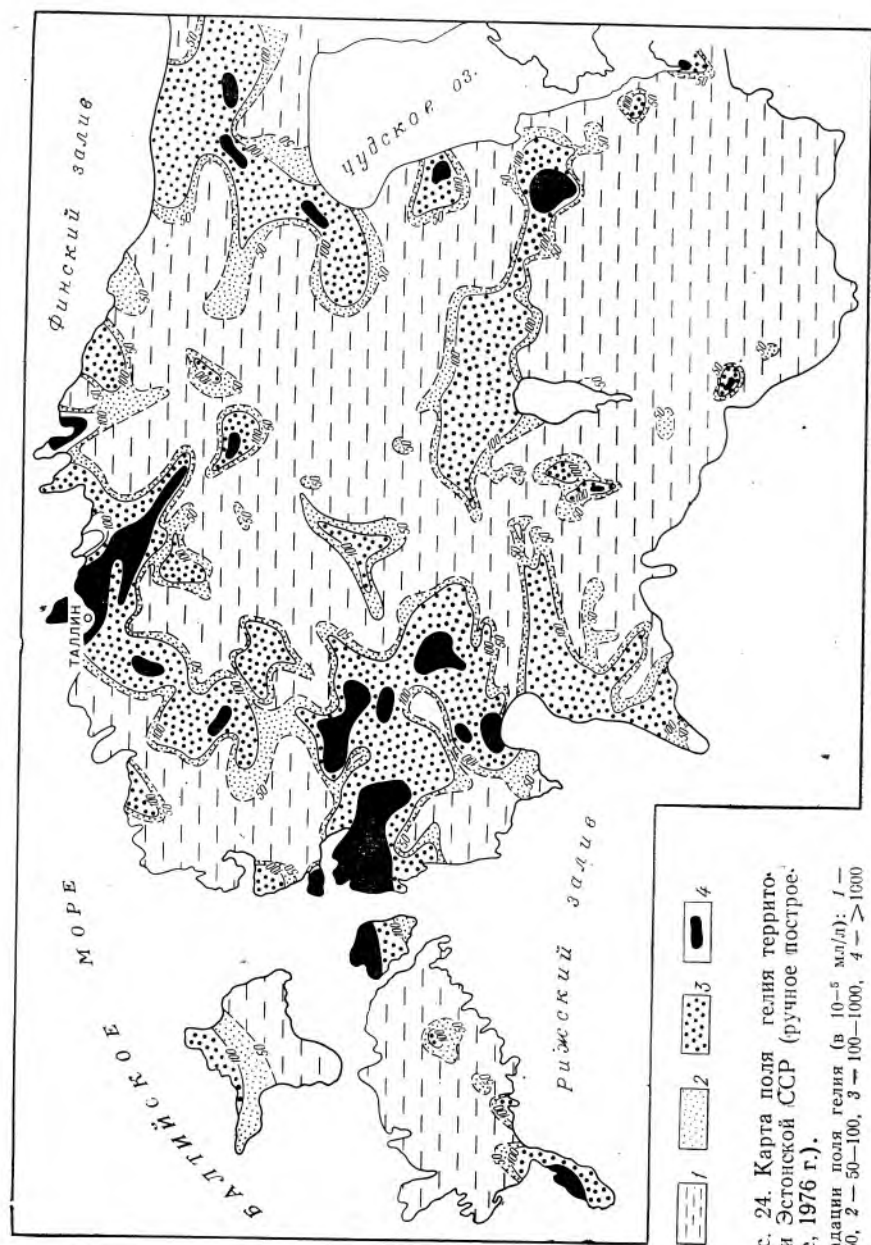


Рис. 24. Карта поля гелия территории Эстонской ССР (ручное построение, 1976 г.).
Градации поля гелия (в 10^{-5} мг/л): 1 — < 50 , 2 — 50—100, 3 — 100—1000, 4 — > 1000

воды на глубине 60—70 м. Число точек (водопунктов) достаточно большое — более 1200 шт.; расположение скважин неравномерное. При составлении карты ручным способом, как и на рис. 19—22, изолинии проводились путем линейной интерполяции значений между соседними точками (рис. 24). При автоматизированной машинной обработке вначале отрабатывалась аппроксимирующая поверхность с учетом значений в окружающих точках, что сглаживает единичный показатель. На основе полученных в усредненных точках величин проводится система изолиний. Такая методика определяет более вероятное построение карты, в особенности при неравномерной сети опробования и значительных изменениях исследуемых концентраций.

Для автоматизированного построения карт и тренд-анализа исходный материал обрабатывался дополнительно (подробное описание методики и программы для ЭВМ изложено в работе И. Д. Савинского, 1975). При этом исследуемая территория разделялась на квадраты, размеры которых определялись густотой расположения на площади опробуемых водопунктов (в среднем 6×6 км). Затем в пределах каждого квадрата, число которых для контура карты составило 906, по расположенным в них водопунктам были усреднены значения концентраций гелия. Полученные величины, отнесенные к центрам квадратов, использовались для построения карт в изолиниях, механическое проведение которых осуществлялось графопостроителем «Атлас» (Савинский и др., 1975).

Аппроксимирующая поверхность изображена на трех картах. Карта интерполяционной поверхности отражает все зафиксированные изменения концентраций гелия в водах (рис. 25, а); карта тренда содержит лишь сглаженную поверхность, обусловленную региональными закономерностями (рис. 25, б). Разность между двумя указанными значениями этих поверхностей определяет остаточную компоненту, характеризующую локальные изменения исследуемых величин; последние изображаются на карте локальных отклонений (рис. 25, в).

На всех сравниваемых картах обнаруживается соответствие в общей картине распределения гелия. Как на рис. 24, так и на рис. 25, а—в аномальными значениями проявились все четыре крупные региональные гелиеносные структуры — Таллинская, Пярнуская, Кохтла-Ярвская и Тартуская. Однако на карте тренда и интерполяционной поверхности более четко выделились границы их распространения. В то же время на карте локальных отклонений более заметны менее крупные (местные) структуры, соответствующие участкам положительных отклонений от тренда.

В последнем случае уточнилась ориентация ряда аномалий: в северо-западной части территории более четко проявились северо-западные и субширотные простирания, а в пределах северо-восточной площади — юго-западные и субмеридиональные.

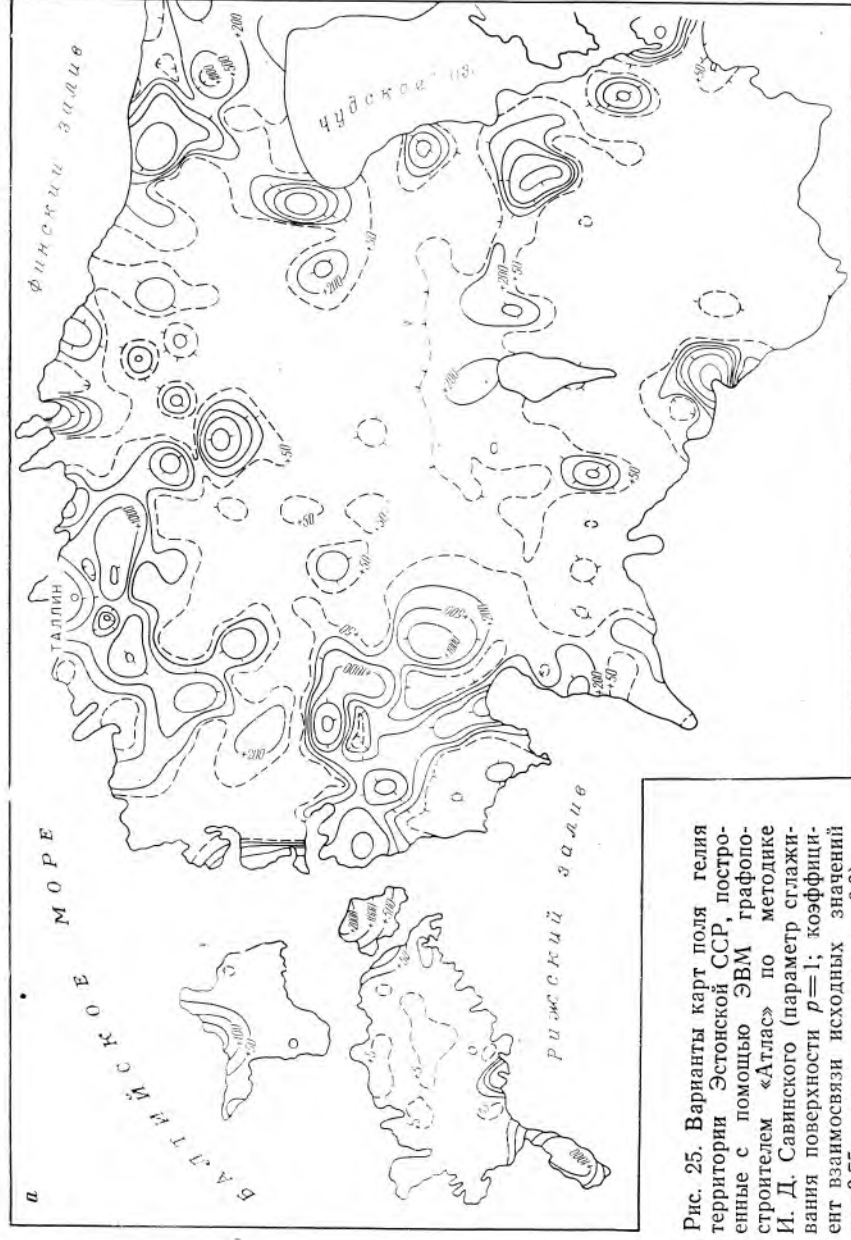
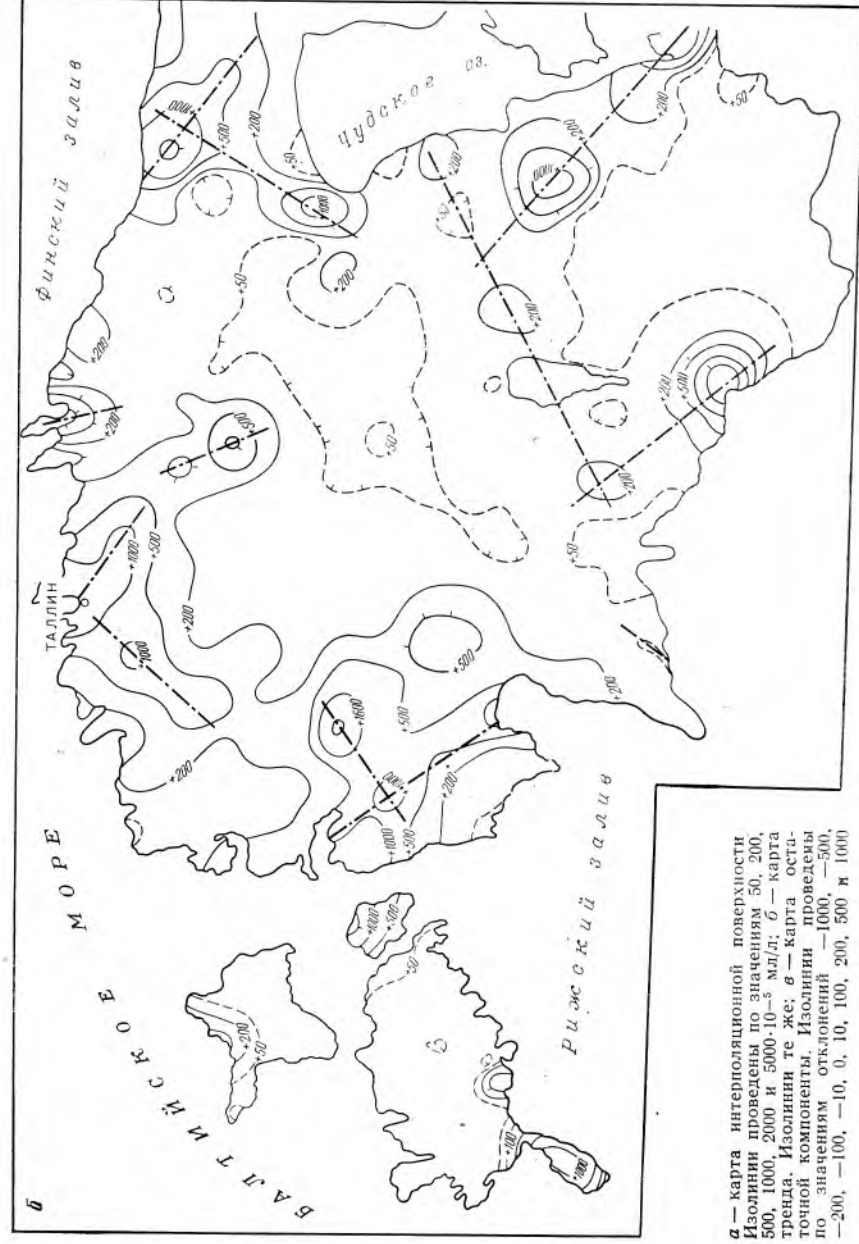
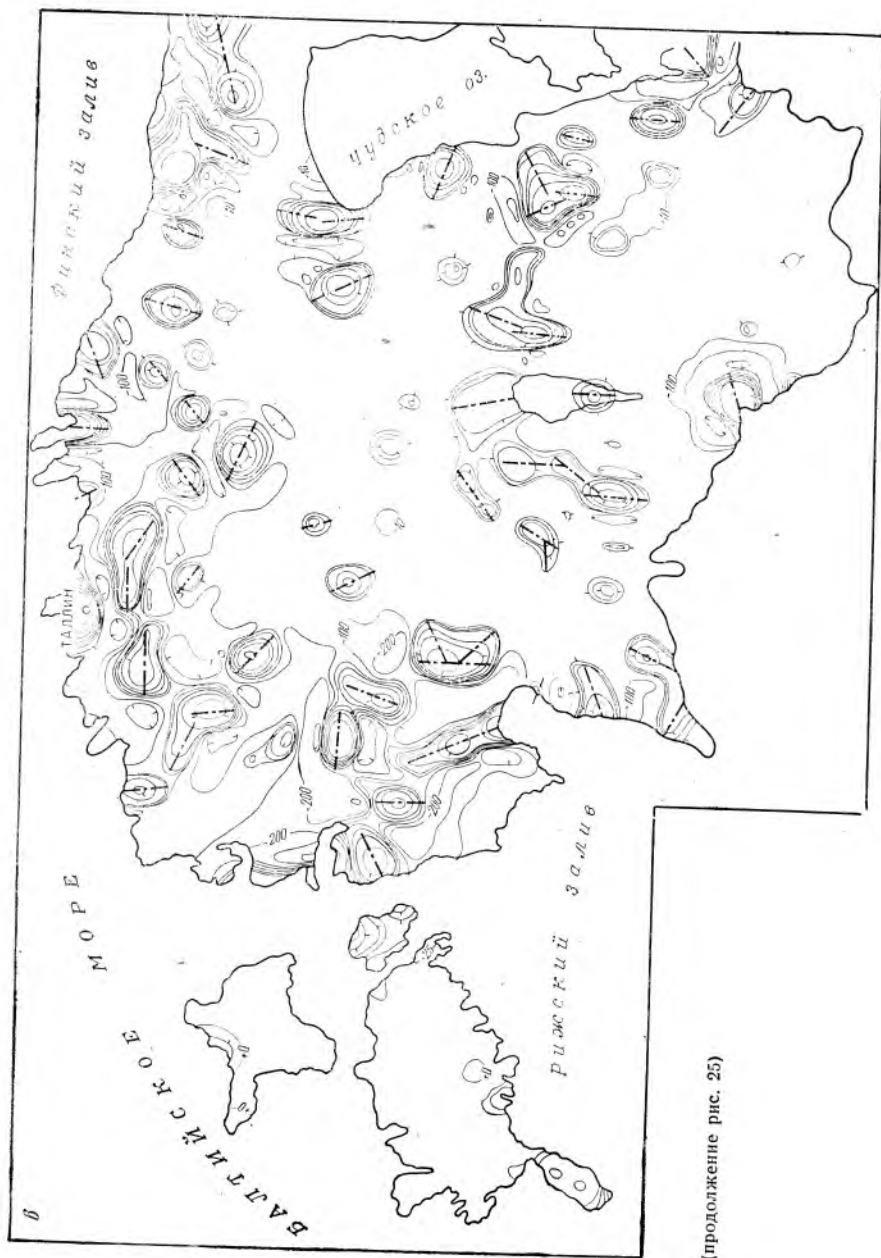


Рис. 25. Варианты карт поля гелия территории Эстонской ССР, построенные с помощью ЭВМ графопроектором «Атлас» по методике И. Д. Савинского (параметр сглаживания поверхности $p=1$; коэффициент взаимосвязи исходных значений $n=0,75$; радиус влияния $\rho=6,0$).



а — карта интерполяционной поверхности. Изолинии проведены по значениям 50, 200, 500, 1000, 2000 и 5000-10-3 м/л/г; б — карта тренда. Изолинии те же; в — карта остаточной компоненты. Изолинии проведены по значениям отклонений -1000, -500, -200, -100, -10, 0, 10, 100, 200, 500 и 1000.



(продолжение рис. 25)

Вследствие этого точнее выявлена общая структура аномалии, отражающая систему современных глубинных разломов.

Приведенные сопоставления не выявляют каких-либо особых различий карт ручного и машинного построения — они отличаются только в деталях. Существенной разницы и не должно быть, поскольку все они формализуют объективную реальность — природное поле гелия. Разница очевидна только по времени построения — на машине затрачиваются лишь первые часы; безусловна также большая точность построения изолиний. По этим признакам предпочтительна машинная обработка — построение карт поля гелия для крупных регионов, с учетом дальнейшего совершенствования программ; она содержит неисчерпаемые возможности гелиметрических исследований.

4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ГЕЛИЕВОЙ СЪЕМКИ

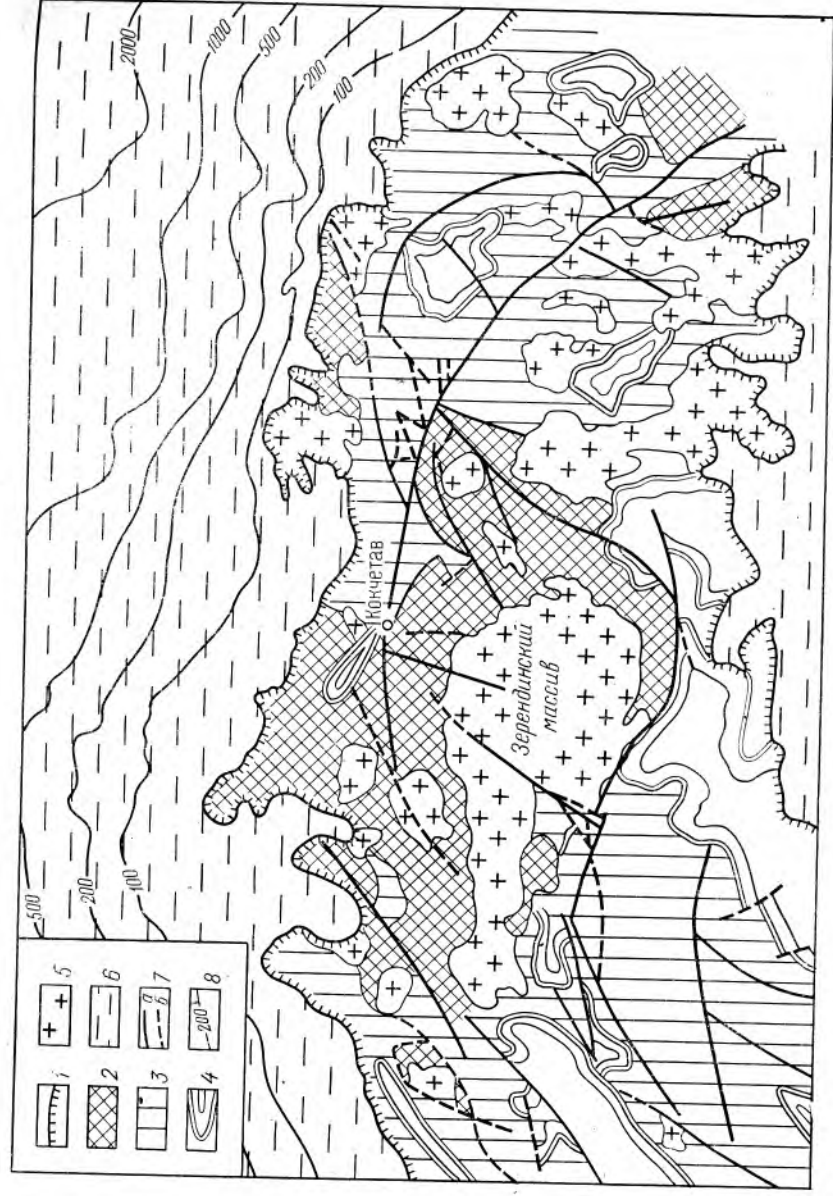
Всесторонние исследования структуры поля гелия выполнены в различных районах Советского Союза. В качестве примеров интерпретации комплекса данных служат Северный и Восточный Казахстан, Днепровско-Донецкая впадина, Московская синеклиза и Прибалтика. Здесь карты гелиевой съемки сопоставлены с основными геологическими, гидрогеологическими и геофизическими материалами: картами силы тяжести Δg , магнитных аномалий ΔT , тектоническими схемами и картами разломов, неотектоническими построениями, данными высотной и космической съемки. В результате установлено, что материалы гелиевой съемки не конкурируют ни с одним из перечисленных методов, поскольку они несут специфическую информацию о проницаемости земной коры и ее геодинамической активности. Рассмотрим эти особенности на ряде примеров.

На рис. 26 представлена геологическая карта Северного Казахстана в границах схем и карт гелиевой съемки (см. рис. 19—21). В области выходящего на поверхность земли докайнозойского фундамента здесь выделены линии глубинных разломов, образующие комбинацию concentрических и диагональных систем. На площади развития кайнозойских пород (северная часть) разломы обычными методами геологического картирования не установлены.

На рис. 27 в том же контуре дана карта поля гелия региона с выделенными различными авторами направлениями основных разломов приповерхностного характера (получены обычными способами геологического картирования). Совпадение гелиеносных и тектонических структур такого типа весьма слабое.

Значительно лучшая корреляция рассматриваемых элементов для поля гелия и систем разломов достигается при построениях с помощью методов глубинной геофизики. На рис. 28 показаны основные разломы (линии физической неоднородности) и грани-

Рис. 26.
Геологическая карта Северного Казахстана (1974 г., упрощенный вариант).

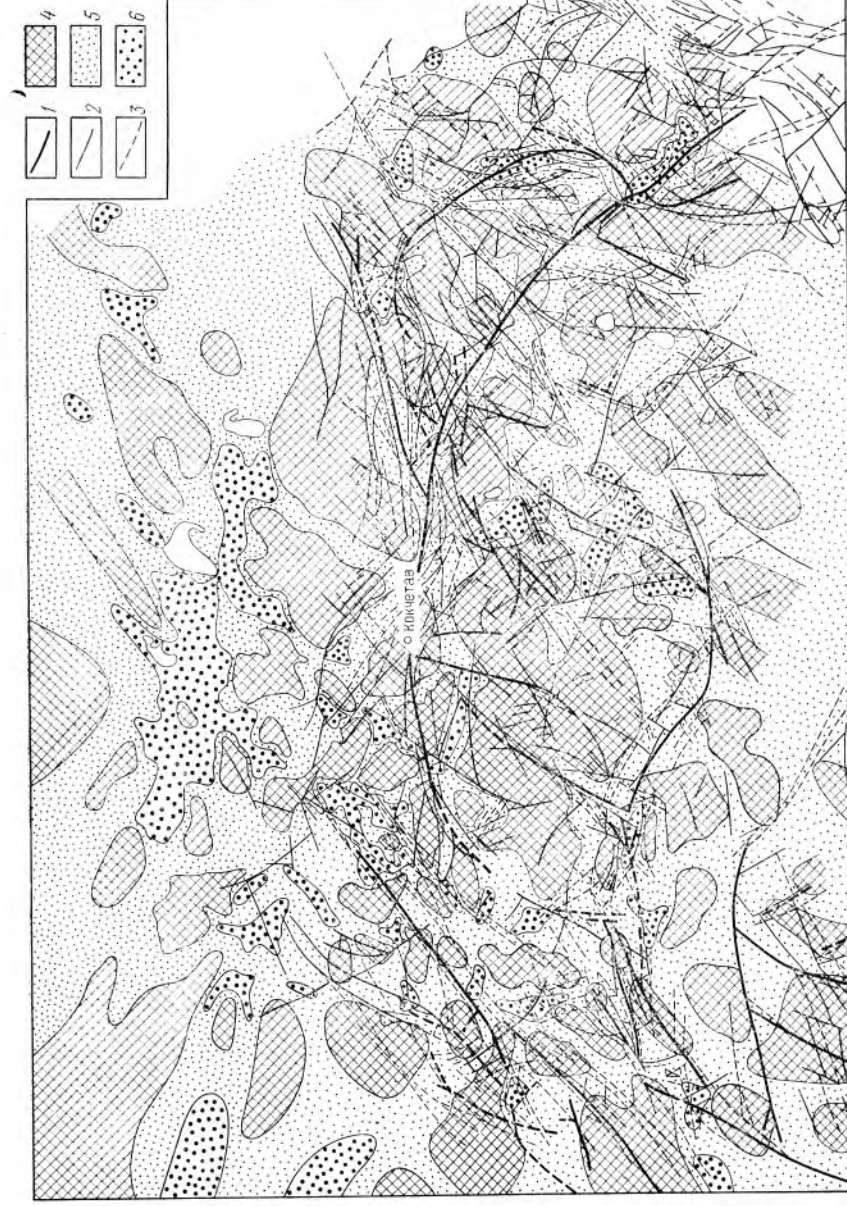


1 — область приповерхностного залегания докембрийских пород, в том числе: 2 — докембрийского возраста, 3 — докембрийского возраста, 4 — докембрийского возраста, 5 — гранитоидного состава всех возрастных групп; 6 — область залегания каменноугольных и четвертичных пород; 7 — главные системы разломов (а — достоверные, б — предполагаемые; 8 — изоглубины залегания фундамента (в м)

Рис. 27.

Карта разрывных нарушений Северного Казахстана в поле гелия, выделенных по комплексу наземного геологического картирования.

1—3 — системы соответственно крупных, средних и предполагаемых разломов; 4—6 — площади соответственно низкой, средней и высокой гелиеносности



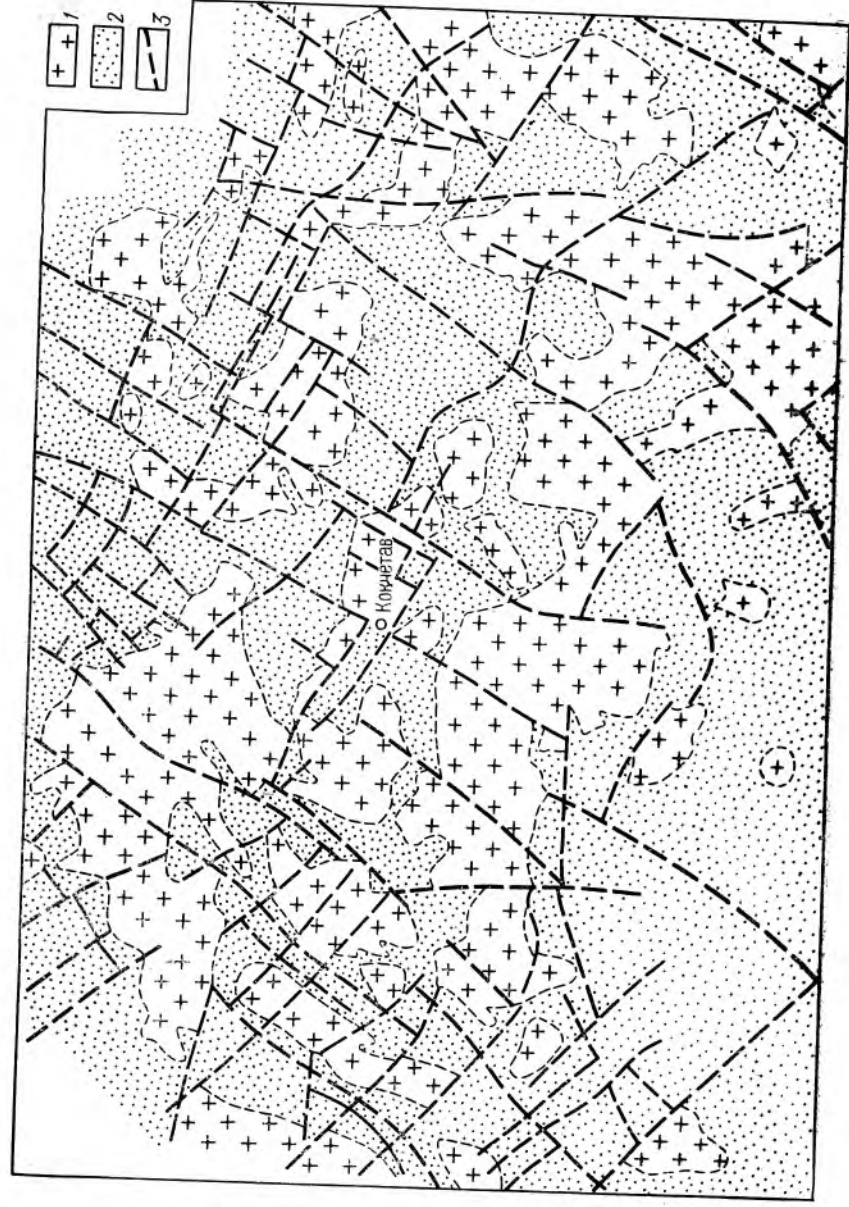


Рис. 28.
Схема разломов и гранитоидных тел Северного Казахстана для глубины 5—10 км (по данным О. Д. Иванова, М. И. Мелентьева, 1966 г.).
1 — гранитоиды; 2 — метаморфический комплекс; 3 — разломы

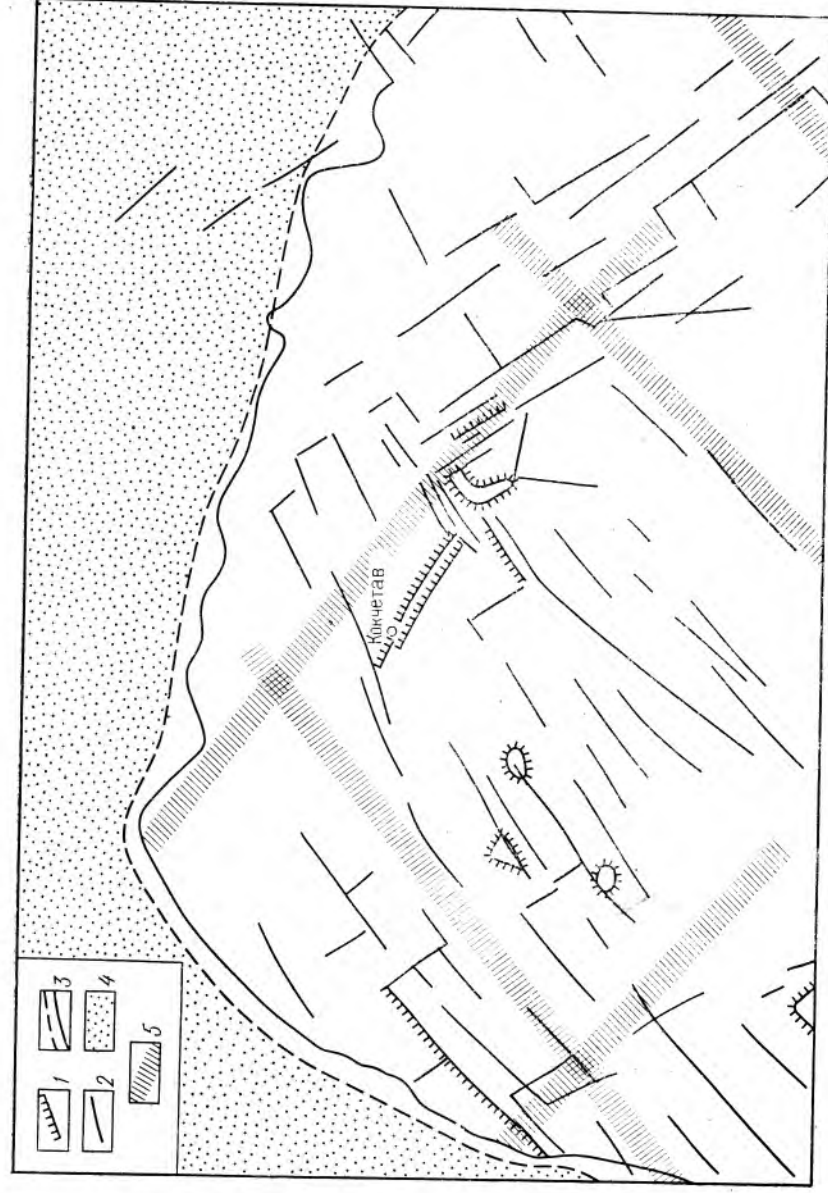


Рис. 29.
Схема неотектонических дислокаций Северного Казахстана (по В. И. Бабаку, 1969 г.) с линиями тектонических линейментов (по А. И. Сунорову, 1968 г.).

1 — наиболее интенсивные блоковые движения; 2 — структурные линии маломасштабных деформаций; 3 — граница области неотектонического поднятия; 4 — области погружения и осадконакопления; 5 — оси древних унаследованных зон подвижных зон

тоидные тела на глубине 5—10 км от поверхности земли (по Иванову, 1967) на фоне приповерхностного поля гелия. Дальнейшая генерализация неоднородностей земной коры приводит к выявлению глубинных структур первого порядка (рис. 29). Совпадение структуры поля гелия с подобными глубинными линеаментами можно считать очевидным.

В свете этого представляется на первый взгляд противоестественной явная связь структуры поля гелия с элементами рельефа дневной поверхности (см. рис. 29). Она объясняется общей связью неотектоники и гелиевых аномалий с вертикальными долгоживущими и унаследованно развивающимися разломами, получившими название «вертикальных безамплитудных» (Косыгин, 1968).

Оказывается, они представляют собой наиболее глубинные тектонические образования земной коры, обусловленные движениями на уровне динамосферы и определяющие ее блоковое стро-

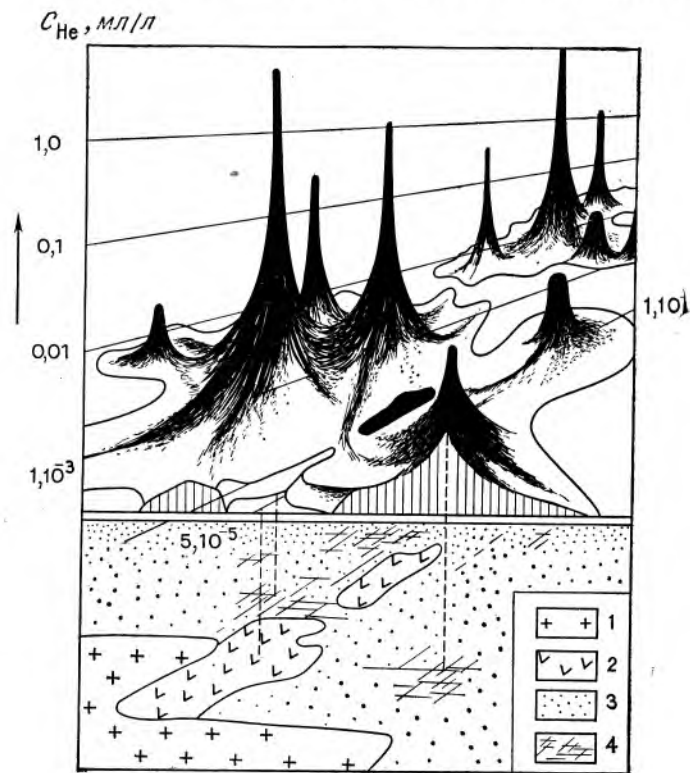


Рис. 30. Концентрационная поверхность поля гелия с определяющей ее геологической ситуацией (внизу).

1 — гранитоиды; 2 — основные породы; 3 — вмещающие породы; 4 — системы проницаемых трещин

ение. Разумеется, «безамплитудными» разломы названы условно, поскольку происходящие в них вертикальные движения обычно развиваются медленно и имеют относительно небольшую амплитуду. Однако именно они определяют современный рельеф, изменяющийся повсеместно, в том числе в таких относительно устойчивых областях, как Московский бассейн Русской платформы. Поэтому подобные разломы лучше называть «вертикальными малоамплитудными». Именно в них постоянно разгружаются микросейсмические, приливные и другие движения земной коры, благодаря чему поддерживаются условия повышенной проницаемости. Через проницаемые зоны под избыточным (над гидростатическим) давлением разгружается в форме фильтрационного потока гелиеносный флюид (рис. 30).

Таков вероятный механизм образования столь неоднородного и контрастного поля гелия в приповерхностном слое литосферы, признаки которого, судя по рассмотренным в главах I и II данным, наблюдаются на всех континентах. Только процессом выжимания гелиеносного флюида под избыточным давлением по зонам повышенной проницаемости можно объяснить эффект «просвечивания» глубинных разломов через мощную толщу осадочных пород, в том числе рыхлых покровов. Этот эффект нашел отражение на рис. 21—28 в северной экранированной части Кокчетавской глыбы, где мощность покровов достигает 200—300 м. В районе г. Рубцовска (на северо-западном продолжении структур Рудного Алтая) гелиеносные рудные узлы зафиксированы под экраном мощностью до 600 м. Наконец, подобные структуры надежно выявляются в Московской синеклизе, где мощность осадочной толщи до 1700 м, и в Днепровско-Донецкой впадине с мощностью пород верхнего структурного этажа до 12 тыс. м.

Чрезвычайно высокая информативность гелиевой съемки позволяет выявлять современные мобильные разломы при любой мощности осадочного чехла и наложенном характере физических полей в разных горизонтах, т. е. в тех сложных условиях, когда все перечисленные выше методы структурного картирования не дают результатов.

Приведенный материал позволяет рекомендовать апробированную схему интерпретации данных гелиевой съемки, в ходе которой следует анализировать всю имеющуюся информацию о строении исследуемого района, особенно в отношении глубинного тектонического строения, гидрогеологии и газового режима.

- Акасофу С. И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. М., Мир, 1974. 382 с.
- Бабак В. И. Новейшие структуры Казахского щита. — Геотектоника, 1969, № 6, с. 86—99.
- Башорин В. Н. Результаты гелиевых исследований на Урале. — В кн.: Материалы семинара. Атмохимические методы поисков рудных месторождений. Ессентуки, 1976, с. 75—80.
- Булашевич Ю. П., Башорин В. Н. Схема проницаемых разрывных нарушений земной коры Северо-Западного Казахстана по данным распределения гелия в подземных водах. — Геотектоника, 1976, № 3, с. 67—73.
- Быков Р. И., Шустер В. Л. Некоторые закономерности изменения концентраций гелия в осадочном чехле Туранской плиты и их геологическая интерпретация. — Изв. АН СССР. Сер. физ.-техн. хим. и геол. наук, 1972, № 4, с. 52—60.
- Вагин С. Б., Гаврилов В. П. Теоретические модели гидрогеологических бассейнов, осложненных региональными разломами, в связи с нефтегазоносностью. — Геология нефти и газа, 1972, № 6, с. 46—51.
- Вернадский В. И. Очерки геохимии. М. — Л., Госгеолнефтеиздат, 1934. 379 с.
- Виндюков П. М., Еремеев А. Н., Яницкий И. Н. Изучение концентраций гелия в артезианских водах. — Водные ресурсы, 1974, № 5, с. 158—169.
- Герлинг Э. К. Миграция гелия из минералов и пород. — Тр. Радиового ин-та АН СССР, 1957а, т. 6, с. 64—87.
- Герлинг Э. К. Попытка обнаружить гелиевое дыхание Земли. — В сб., посвященном акад. В. И. Вернадскому. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1957б, с. 146—154.
- Голубев В. С., Осипов Ю. Г., Яницкий И. Н. Некоторые особенности миграции гелия в проницаемых системах верхней части земной коры. — Геохимия, 1970, № 11, с. 1341—1348.
- Голубев В. С., Еремеев А. Н., Яницкий И. Н. Анализ некоторых моделей миграции гелия в литосфере. — Геохимия, 1974, № 7, с. 1067—1076.
- Грамаков А. Г., Глебовская В. С., Хайкович И. М. К теории гелиевого метода поисков месторождений радиоактивных элементов. — Вопросы рудной геофизики, 1965, вып. 5, с. 3—19.
- Гуцало Л. К. О генезисе гелия в подземных водах ДДВ. — Геохимия, 1965, № 1, с. 108—113.
- Дикун А. В., Коробейник В. М., Яницкий И. Н. О некоторых особенностях развития гелиевой съемки. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1975, № 1, с. 150—152.
- Еремеев А. Н., Ершов А. Д., Яницкий И. Н. Некоторые аспекты гелиевой съемки при структурно-геологическом картировании и прогнозе эндогенного оруденения. — В кн.: Геохимические методы при поисках и разведке рудных месторождений. М., 1971, с. 49—66.
- Еремеев А. Н., Яницкий И. Н. Гелий раскрывает тайны земных недр. — Природа, 1975, № 1, с. 23—33.
- Еремеев А. Н., Яницкий И. Н. Анализ данных гелиевой съемки применительно к прогнозу эндогенного оруденения. — В кн.: Материалы семинара «Атмохимические методы поисков рудных месторождений». Ессентуки, 1976, с. 70—74.
- Жиров К. К., Кравченко М. П. Об избыточном аргоне в некоторых минералах. — Геохимия, 1970, № 11, с. 1349—1356.
- Задорожный И. К. Распределение инертных газов и радиационная обстановка в районах посадки автоматических станций «Луна-16» и «Луна-20». — В кн.: Тез. докл. VI Всесоюз. симп. по стаб. изот. в геохимии. М., 1976, с. 14—16.
- Закономерность распределения концентраций гелия в земной коре / А. Н. Еремеев, В. Н. Башорин, Ю. Г. Осипов и др. — В кн.: Открытия в СССР, 1968—1969 гг. М., 1970, с. 14—15.
- Иванов О. Д., Мелентьев М. И. Основные черты геологического строения погребенного докембрийского фундамента к северо-западу от Кокчетавской глыбы. — Вестн. АН КазССР, 1966, № 6, с. 98—114.
- Измерительная аппаратура для анализа гелия при геологических исследованиях / Л. Е. Левина, В. В. Пименов, В. В. Стадник и др. ЭИ ВИЭМС, сер. 10, 1975, вып. 1. 22 с.
- Изотопный состав гелия в некоторых породах / Э. К. Герлинг, Б. А. Мамырин, И. Н. Толстухин, С. С. Яковлева. — Геохимия, 1971, № 10, с. 1209—1217.
- Изотопы гелия в осадках океанов / А. Я. Крылов, Б. А. Мамырин, Ю. И. Силин, Л. В. Хабарин. — Геохимия, 1973, № 2, с. 284—288.
- Изотопы гелия в природе / И. Л. Каменский, В. П. Якуцени, Б. А. Мамырин и др. — Геохимия, 1971, № 8, с. 914—931.
- Карпинская Т. Б., Шанин Л. Л., Борисевич И. В. Искусственное внедрение аргона в слюду, оливин и пироксен. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1965, № 11, с. 14—16.
- Карякин А. В. О механизме выделения гелия из метамиктных цирконов. — Геохимия, 1962, № 8, с. 660—664.
- Козлов А. Л. Проблемы геохимии природных газов. М., Гостоптехиздат, 1950. 168 с.
- Коробейник В. М., Яницкий И. Н. О транскоровом газовом потоке. — ДАН СССР, т. 221, 1975, № 2, с. 339—342.
- Корценштейн В. Н. Методика гидрогеологических исследований нефтегазоносных районов. М., Недра, 1976. 309 с.
- Кропоткин П. Н., Валяев Б. М. О природе аномально высоких пластовых давлений в нефтяных и газовых месторождениях. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1965, № 11, с. 29—46.
- Кузнецов С. С. О непрерывности колебательных движений блоков фундамента земной коры Русской платформы в фанерозое. Изд-во ЛГУ, т. 73, вып. 2, с. 30—54.
- Кюри М. С. Радиоактивность. М., Физматгиз, 1960. 516 с.
- Магнитораэрядный индикатор гелия / В. В. Голоскоков, В. Т. Кузьмина, Л. Е. Левина и др. — Приборы и техника эксперимента, 1973, № 1, с. 175—178.
- Морозова И. М., Ашкинадзе Г. Ш. Миграция атомов редких газов в минералах. Л., Наука, 1971. 121 с.
- Намиот А. Ю., Бондарева М. М. Растворимость газов под давлением. М., Гостоптехиздат, 1963. 148 с.
- Ньютон Р., Роунд Г. Ф. Диффузия гелия в осадочных породах. — Геохимия, 1961, № 4, с. 332—353.
- Олдрич Л. Т., Нир А. О. Нахождение He^3 в природных источниках гелия. — В кн.: Изотопы в геологии. М., 1954, с. 589—597.
- Петровская Н. Л. О влиянии докембрийского фундамента на гелиеизносность газовой залежи. — Геология нефти и газа, 1972, № 6, с. 63—66.
- Прасолов Э. М., Толстухин И. Н. К вопросу о происхождении изотопа He^3 в микровключениях сотового кварца Волыни. — Геохимия, 1972, № 6, с. 727—730.
- Ранкама К. Изотопы в геологии. М., Изд-во иностр. лит., 1956. 464 с.
- Роджерс Д. Ш. Гелиеизносные природные газы. М., ОНТИ, 1935. 214 с.
- Розен О. М., Яницкий И. Н. Основные черты тектоники Кокчетавского докембрийского массива и распределение глубинного потока гелия. — ДАН СССР, т. 216, 1974, № 2, с. 401—404.
- Савинский И. Д. Применение математических методов и ЭВМ при выборе разведочных сетей и построении планов в изогониях. М., Недра, 1974. 114 с.
- Савченко В. П. Формирование, разведка и разработка месторождений газа и нефти. М., Недра, 1977. 413 с.
- Связь изотопного состава гелия с его упругостью / Э. В. Бородзич,

- П. В. Домнин, А. Н. Еремеев и др. — В кн.: Тез. докл. VI Всесоюзного симп. по стаб. изотопам в геохимии. М., 1976, с. 95—97.
- Соколов В. А. Миграция нефти и газа. М., Изд-во АН СССР, 1956. 352 с.
- Суворов А. И. Закономерности строения и формирования глубинных разломов. М., Наука, 1968. 316 с.
- Судов Б. А., Тибар К. О. Картирование зон глубинных тектонических нарушений методом водногелевой съемки. — Разведка и охрана недр, 1977, № 10, с. 29—33.
- Толстихин И. Н., Азбель И. Я., Хабарин Л. В. Изотопы легких инертных газов в мантии Земли, коре и атмосфере. — Геохимия, 1975, № 5, с. 653—666.
- Тугаринов А. И., Осипов Ю. Г. О диффузии и фильтрации гелия через образцы горных пород и минералов. — Геохимия, 1977, № 7, с. 992—1002.
- Фридман А. И. Природные газы рудных месторождений. М., Недра, 1970. 192 с.
- Харлей П. М. Гелиевый метод определения возраста. — В кн.: Ядерная геология. М., Изд-во иностр. лит., 1956. 464 с.
- Хлопин В. Г., Герлинг Э. К. Новые данные о геохимии инертных и благородных газов. — Избр. труды. Т. 2. М. — Л., Изд-во АН СССР, 1957, с. 210—214.
- Чердынцев В. В., Колесников Е. М. Аргон древних осадочных пород. — Геохимия, 1964, № 9, с. 849—854.
- Шорохов Г. П., Башорин В. Н. Газовая съемка при поисках медноколчеданного оруденения. — Разведка и охрана недр, 1975, № 9, с. 13—15.
- Шуколоков Ю. А., Левский Л. К. Геохимия и космохимия изотопов благородных газов. М., Атомиздат, 1972. 335 с.
- Шуколоков Ю. А., Шариф-Заде В. Б., Ашкинадзе Г. Ш. Изотопы неона в природных газах. — Геохимия, 1973, № 4, с. 475—483.
- Якуцени В. П. Геология гелия. Л., Недра, 1968. 232 с.
- Яницкий И. Н. О механизме формирования гелиеносных газов. — Сов. геология, 1974, № 11, с. 53—66.
- Яницкий И. Н., Коробейник В. М. Гелий — индикатор водообмена в гидросфере Земли. — Геохимия, 1975, № 11, с. 1345—1347.
- Яницкий И. Н., Коробейник В. М., Созинова Т. В. Отражение разломов земной коры в полях гелия. — Геотектоника, 1975, № 6, с. 80—90.
- Яницкий И. Н., Пименов В. В. Сюрпризы подземной гидросферы. — Природа, 1976, № 3, с. 44—56.
- Anderson C. C., Hinson H. H. Helium-bearing natural gases of the United States. Analyses and analytical methods. U. S. Bur. Mines Bull. 486. 1951. 141 p.
- Bowie S. H. Helium in natural gas in the Witwatersrand. Nature, L.-V. 182, 1958, p. 1082—1083.
- Cook G. Ed. Argon, helium and rare gases. N. Y. Intersci. 1961. 111 p.
- Damon P. E., Kulp J. L. Inert gases and the evolution of the atmosphere. — Geochim. cosmochim. acta, 1958, v. 13, p. 280—292.
- Dean J. W., Lauth R. E. Four Corners keeps lead in production of helium gas. — The Oiland Gas Journal, 1961, Feb. 20, p. 194—201.
- Deaton W. M. Helium another natural gas. — Mines. Mag., 49, 1959, No. 11, p. 9—46.
- Eremeev A. N., Solovov A. P., Yanitsky I. N. Application of helium surveying to structural mapping and ore deposit forecasting. — Geochemical Exploration, 1972, Inst. Min. and Met. L. p. 183—192.
- Gaseous geochemical methods in structural mapping and prospecting for ore deposits/L. N. Ovchinnikov, V. A. Sokolov, A. I. Fridman, I. N. Yanitskii. — Geochemical exploration, 1972, Inst. Min. and Met. L.
- Grip E., Ödman H. O. On thucholite and natural gas from Boliden. — Sveriges geologiska Undersökning, 1944, N 6, arcbook 38. 18 p.
- Harris J. F. Geological investigations, sampling and diamond-drilling at Manyedhi helium-bearing hot springs, Singida district. Tanganyika, Geological Survey Records, 8, 1958. 86 p.
- Hitchon B. Geochemical studies of natural gases. P. 111. Inert gases in Western Canadian natural gases. Canad. petrol. technol., 1963, v. 2, N 4, p. 94—122.
- Hugo P. J. Helium in the Orange Free State goldfield, Pretoria. — Geol. Surv., 1963, Bull. 39. 28 p.
- Keevil N. B. The distribution of helium and radioactivity in rocks. — Amer. Journ. Sci., 1942, V. 236, p. 406—416.
- Mayne K. J. Terrestrial helium. — Geochim. cosmochim. acta, 1956, vol. 9. 174 p.
- Studies of artesian water movement using natural and technogenic helium/V. N. Kunin, V. S. Kovalevsky, A. N. Eremeev, I. N. Yanitsky. — Memories of the Congress in Montpellier, 1974, France. T. X., p. 221—227.
- Turekian K. K. The terrestrial economy of helium and argon. — Geochim. cosmoch. acta, 1959, vol. 17, N 1/2, p. 37—43.

ВВЕДЕНИЕ	Стр. 3
Глава I. ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	5
Глава II. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАХОЖДЕНИИ И РАСПРЕДЕ- ЛЕНИИ ГЕЛИЯ В НЕДРАХ	16
1. Образование гелия при радиоактивном α -распаде	16
2. Миграционные формы гелия	17
3. Диффузионная миграция	19
4. Конвективно-фильтрационная миграция	22
5. Распределение гелия разных форм в природных объектах	25
6. Методика и результаты балансовых расчетов	27
7. Оценка масштабов гелиенирования кристаллического суб- страта	30
8. Варианты концентрационной модели гелия Земли	33
Глава III. ИЗУЧЕНИЕ ПОТОКА ГЕЛИЯ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЛИТОСФЕРЫ	40
1. Газогелиевая съемка	40
2. Водногелиевая съемка	43
3. Керновая гелиевая съемка	47
4. Выбор оптимального варианта съемки	49
Глава IV. МЕТОДИКА ВОДНОГЕЛИЕВОЙ СЪЕМКИ	50
1. Объекты наблюдения	50
2. Характер фазовых распределений	50
3. Отбор проб	52
4. Транспортировка и хранение проб	56
5. Учет потерь гелия из проб в процессе хранения	57
6. Измерительная аппаратура	58
7. Эталонировочные системы	62
8. Определение концентраций гелия в системе непрерывной регистрации сигнала	65
Глава V. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕЛИЕВОЙ СЪЕМКИ	66
1. Расчет полной гелиенасыщенности порового пространст- ва подземной среды	66
2. Выбор универсального выражения интенсивности поля гелия	70
3. Составление картографического материала	73
4. Интерпретация данных гелиевой съемки	85
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	92