

А. М. Сычёва-Михайлова

**МЕХАНИЗМ
ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ОБСТАНОВКЕ ИНВЕРСИИ
ПЛОТНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД**

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Введение	5
Методы исследования	6
I. Условия образования соляных структур в Прикаспийской впадине	
Основные черты геологического строения Прикаспийской впадины	9
Некоторые особенности строения фундамента	10
Строение платформенного чехла	14
Тектоническое районирование Прикаспийской впадины по солевому и надсолевому комплексам	23
Соляная тектоника периферических частей Прикаспийской впадины	24
Соляная тектоника внутренней части Прикаспийской впадины	31
Внешние прибрежные зоны Прикаспийской впадины	44
Особенности размещения, строения и развития соляных структур Прикаспийской впадины	45
II. Экспериментальные исследования	
Краткий обзор изучений процесса формирования соляных структур путем моделирования	53
Изучение процесса перемещения материала в обстановке инверсии плотности в моделях	56
Задачи моделирования	56
Условия подобия	57
Свойства эквивалентных материалов	58
Исходные данные, принятые для основных серий опытов	65
Выполнение опытов	65
Закономерности процесса перемещения в обстановке инверсии плотности на моделях из двух вязких жидкостей и из твердых пластичных слоистых материалов	67
Закономерности развития гравитационной неустойчивости в условиях инверсии плотности, по данным экспериментальных исследований	114
III. Сопоставление данных экспериментальных исследований с геологическими условиями образования соляных структур в Прикаспийской впадине	
Моделирования соляных структур	118
.	129
.	131

А. М. СЫЧЕВА-МИХАИЛОВА

МЕХАНИЗМ
ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ОБСТАНОВКЕ ИНВЕРСИИ
ПЛОТНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

595



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва 1973



Сычева-Михайлова А. М. Механизм тектонических процессов в обстановке инверсии плотности горных пород. М., «Недра», 1973, 136 с.

Закономерности развития тектонических деформаций в условиях инверсии плотности горных пород изучались путем выяснения геологической обстановки формирования соляных структур в Прикаспийской впадине и экспериментальных исследований. Применение моделирования при тектонических исследованиях способствует пониманию механизма природных процессов. Моделирование процесса формирования соляных куполов производилось на вязких жидкостях и твердых пластичных материалах. В последнем случае применялась центрифуга. На моделях воспроизводились различные формы соляных структур и процесс их развития при разных значениях вязкости, мощности и плотности материалов, имитирующих соль и надсолевые толщи. Результаты моделирования сопоставлялись со строением и историей формирования соляных структур в Прикаспийской впадине. В итоге в природных условиях и в опытах установлены сходные закономерности в этом процессе, полнее выявлены особенности развития соляных структур в Прикаспийской впадине. Соляные структуры рассматриваются как природные модели, изучение которых может способствовать выяснению механизма образования структур нагнетания глубинного происхождения. Изучение особенностей развития этих структур имеет также и практическое значение, поскольку в солянокупольных областях к ним приурочены месторождения нефти. Книга рассчитана на геологов, ведущих работы в областях развития различных диапировых структур, преподавателей и студентов старших курсов геологических вузов и факультетов.

Таблиц 12, иллюстраций 84, список литературы — 168 названий.

0292—163
C 86—73
043(01)—73

АННА МИХАЙЛОВНА СЫЧЕВА-МИХАЙЛОВА
МЕХАНИЗМ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ОБСТАНОВКЕ ИНВЕРСИИ ПЛОТНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД

Редактор издательства З. А. Смирнова

Технический редактор В. В. Романова

Корректор Г. А. Меркулова

Сдано в набор 14/XII 1972 г. Подписано в печать 9/II 1973 г. Т-01273 Формат 70×108¹/₁₆ Бумага № 1
Печ. л. 9 с 1 вкл. Усл. п. л. 12,6 Уч.-изд. л. Тираж 1200 экз. Заказ № 1379/4210-1 Цена 1 р. 26 к.

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

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, 109088, Южнопортовая ул., 24.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Тектоническое моделирование за последнее время завоевывает широкое признание. У нас в стране большую роль в этом отношении сыграли общеизвестные работы М. В. Гзовского. Из современных зарубежных авторов следует отметить Х. Рамберга.

Однако помимо новых возможностей, открывающихся перед тектоникой в связи с применением моделирования, неоднократно отмечались и те трудности, которые возникают перед этим методом, и те ограничения, на которые он наталкивается. Трудности и ограничения связаны главным образом с тем, что далеко не все параметры природных условий могут быть в должных соотношениях воспроизведены на моделях. Никому еще не удавалось, например, воспроизвести на модели одновременно и вязкость, и прочность, и зависимость той и другой от величины напряжений и времени действия. Обычно воспроизводится какое-либо одно свойство, а другие приходится просто игнорировать. Это, конечно, вносит в результаты моделирования неопределенность, иногда, вероятно, значительную.

В этих условиях в наиболее выгодном положении оказываются те модели, которые воспроизводят тектонические условия, почти полностью определяемые каким-либо свойством горных пород. Например, хрупкие разрывы определяются целиком прочностью породы и для их моделирования достаточно воспроизвести именно это свойство. К разряду таких процессов, связанных преимущественно с одним деформационным свойством материала, принадлежит и образование диапиро-вых куполов, понимаемое как всплытие менее плотного материала внутри более плотного. Хотя в деталях течение этого процесса может зависеть от прочности пород, в основном он определяется вязкостью среды. Именно от вязкости как вмещающих, так и внедряющихся пород зависят форма куполов и скорость их подъема (конечно, при определенных соотношениях между плотностями обоих материалов).

Это обстоятельство, чрезвычайно облегчающее моделирование, явилось причиной того, что в истории тектонического моделирования диапировые купола воспроизводились на моделях очень часто. Такие модели описывались много раз, начиная с первых экспериментов Л. Л. Неттльтона в 30-х годах XX в. и кончая самыми последними работами Х. Рамберга. Действительно, полученные в моделях с вязкими жидкостями диапировые структуры обнаруживали столь близкое сходство с природными объектами, что едва ли можно было сомневаться в правильности принципа, положенного в основу таких моделей.

До сих пор, однако, модели диапировых куполов носили преимущественно иллюстративный характер. Они лишь в самом общем виде указывали на то, что процесс всплытия вязкого материала внутри другой вязкой среды, обладающей большей плотностью, может объяснить природное диапирообразование. В предлагаемой читателю монографии А. М. Сычевой-Михайловой моделирование использовано

впервые не как общая иллюстрация, а как метод исследования. Постепенно меняя в широких пределах вязкость материала как вмещающей среды, так и внедряющейся, соотношение их плотностей и толщину первоначально образуемых ими слоев, автор в результате большой серии экспериментов выводит определенные закономерности и устанавливает, как изменение перечисленных условий влияет на размеры куполов, на их относительное размещение, на скорость их роста, а в развитии куполов выделяет ряд отдельных стадий. Полученные результаты сопоставляются со строением и геологической историей конкретного района — Прикаспийской депрессии, где соляные диапировые купола широко распространены. Такое сопоставление показывает, что аналогичные закономерности проявляются и в природной обстановке.

Это имеет большое значение и свидетельствует о том, что тектоническое моделирование, по крайней мере в проблеме диапировых структур, представляет собой метод, способный содействовать пониманию механизма природных процессов. Поскольку диапировые явления далеко не ограничиваются соляными куполами, а в свете новейших научных данных, возможно, лежат в основе весьма широкой гаммы структурных преобразований как в земной коре, так и в более глубоких оболочках, метод моделирования становится чрезвычайно важным. Конкретно, применительно к солянокупольным районам, полученные результаты позволяют делать структурные прогнозы для глубин, пока не изученных и труднодоступных для непосредственного изучения. Такие прогнозы оказываются возможными, например, для межкупольных пространств. А выделение стадий развития куполов позволяет понять различия между куполами, находящимися на разных этапах подъема.

Можно надеяться, что полученные автором результаты будут использованы при изучении различных солянокупольных районов Советского Союза и увеличат число геологов, которые в своей деятельности обратятся к тектоническому моделированию, как к ценному методу исследования.

Член-корр. АН СССР, проф. *B. V. Белоусов*

ВВЕДЕНИЕ

Тектонические структуры, созданные силой тяжести, действующей в условиях инверсии плотности горных пород, довольно часто встречаются в земной коре. Они, видимо, могут быть обнаружены и во внешней оболочке мантии. К ним относятся соляные и глиняные диапиры, «глубинные диапиры» и другие структуры, называемые складками нагнетания, а также магматические астенолиты, вероятно, вспывающие из волновода верхней мантии. Изучение механизма тектонических процессов в обстановке инверсии плотности горных пород имеет большое теоретическое и практическое значение. Так, выяснение формирования соляных куполов важно для правильного направления поисков нефтяных и газовых месторождений.

О механизме тектонических процессов, развивающихся в условиях инверсии плотности горных пород, до настоящего времени не было достаточно полного представления. Закономерности этого процесса наиболее доступны для изучения на примере развития соляных структур.

При выяснении особенностей развития соляных структур применялось моделирование, которое проводилось применительно к условиям их развития в Прикаспийской впадине. Для этого были проанализированы геологические и геофизические материалы. Условия экспериментов, по возможности, были приближены к природным. Моделирование процесса формирования соляных куполов осуществлялось на вязких жидкостях и твердых пластичных материалах. В моделях из твердых материалов применялась центрифуга (Сычева-Михайлова, 1970, 1972а, б).

На моделях воспроизводились различные формы соляных структур, возникающих при разных исходных условиях, и процесс их развития. Результаты моделирования сопоставлялись со строением и историей формирования соляных структур в Прикаспийской впадине. В итоге в природных условиях и в опытах были установлены определенные сходные закономерности в этом процессе. Экспериментальные работы дали возможность полнее выявить особенности развития соляных структур в Прикаспийской впадине. Некоторые закономерности можно применить и для объяснения механизма глубинных процессов, для которых соляные структуры служат природными моделями.

Настоящая работа является итогом исследований, которые проводились с 1962 по 1968 г. в лаборатории тектонофизики кафедры динамической геологии геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова под руководством чл.-корр. АН СССР проф. В. В. Белоусова, которому автор приносит глубокую благодарность за постоянное содействие и внимание к работе.

За консультации по вопросам физической стороны деформаций и определения свойств эквивалентных материалов автор выражает искреннюю признательность М. П. Воларовичу, Е. В. Артюшкову, А. С. Григорьеву и Д. Н. Осокиной, а за помощь и советы при сборе и анализе геолого-геофизических материалов по Прикаспийской впадине — Н. В. Неволину, Я. С. Эвентову, И. И. Кожевникову, Б. А. Соловьеву, Л. Б. Аристарховой, Л. В. Волчегурскому и Ю. М. Бутковскому. Автор также признателен Г. П. Горшкову и В. С. Журавлеву, которые сделали ряд ценных замечаний и дополнений.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются структурные формы, образование которых связано с тектоническими движениями, возникающими при неустойчивом расположении менее плотных пород под, более плотными. Такие формы часто встречаются в природе.

В поверхностных слоях земной коры, главным образом в отложениях четвертичной системы, наблюдаются многочисленные мелкие нарушения, связанные с неустойчивым расположением пластичных насыщенных водой менее плотных глинистых слоев среди более плотных песчаных (Артюшков, 1963а, б, 1964, 1965). В верхней части земной коры в ряде областей развиты соляные, глиняные диапиры и другие структуры, называемые складками нагнетания. Они формируются в результате подъема вверх легкой пластичной соли или глины, насыщенной водой или газовыми компонентами, через покрывающие их более тяжелые породы. В более глубоких зонах земной коры внедрение «глубинных диапиров» и интрузивных тел может происходить в тех случаях, когда их материал находился в разуплотненном состоянии и располагался под более тяжелыми породами.

Тектонические движения в условиях инверсии плотности (при расположении сверху тяжелых слоев, а под ними легких) происходят, вероятно, и в более глубоких оболочках земли, в частности в верхней части мантии, где они, видимо, связаны с наличием в верхней части мантии волновода, т. е. слоя пониженных скоростей распространения упругих волн (Гутенберг, 1963; Магницкий, 1958, 1965; Магницкий, Хорошева, 1960). Волновод расположен на глубине 100—250 км под материками и на глубине 50—400 км под океанами. Понижение скоростей распространения сейсмических волн в толще волновода вызывается частично температурным эффектом, но главным образом жидкими включениями базальта, которые выплавляются из ультраосновных пород верхней мантии (Белоусов, 1966). Выплавление базальта приводит к понижению плотности вещества волновода. Из этого следует, что в кровле волновода имеется обстановка инверсии плотности и, следовательно, возможно перемещение.

Таким образом, тектонические проявления неустойчивости, связанные с обратным расположением пород по плотности, в недрах Земли широко развиты. Возможно, такая гравитационная неустойчивость является одной из основных причин тектонических движений.

Закономерности развития гравитационной неустойчивости изучались путем выявления геологических условий образования соляных структур в Прикаспийской впадине и моделирования процесса их формирования. В качестве природного объекта избрана Прикаспийская впадина, потому что она является самой крупной областью развития соляных структур и характеризуется разнообразием условий их образования. Кроме того, по этой территории составлены комплекс сводных карт (палеогеологическая предверхнеплиоценового среза; тектонические, карты физических полей) и геолого-геофизические разрезы.

Для выявления тектонического строения Прикаспийской впадины и условий формирования в ее пределах соляных структур анализированы геолого-геофизические материалы коллективов геологов ВНИГРИ, МИНХиГП, ВНИГНИ, экспедиции ВАГТа, Союзбургаза, ВНИИГеофизики, ВНИИГаза и Геологического института АН СССР, что позволило конкретизировать программу проведения экспериментальных исследований.

Для выяснения закономерностей размещения соляных структур в Прикаспийской впадине большое значение имели геологические карты со снятым покровом верхнеплиоценовых и четвертичных отложений, составленные для северо-восточной и центральной ее частей, а также схемы тектонического строения впадины (Соловьев, Кожевников и др., 1966 г.; Волчегурский, 1968 г.; Неволин, 1961, 1965; Журавлев, 1963; Эвентов, 1962а). При развитии мощных покровных отложений составление этих карт стало возможным лишь после проведения бурения. При изучении геологического строения впадины использованы также данные геофизических работ.

Путем многократного повторения экспериментов с различными эквивалентными материалами при изменяющихся условиях (мощности, вязкости и плотности легкого и тяжелого слоев и др.) установлено, какие факторы определяют размеры соляных структур, их расположение на площади, особенности хода развития и т. д.

Моделирование на первом этапе проводилось на вязких жидкостях. Выбор эквивалентных материалов для опытов на вязких жидкостях производился с учетом требований теории физического подобия. Расчеты величин их вязкости (см. стр. 57) показали: что она может составлять 10^3 пуз. Такой вязкостью обладают: смесь битума с нигром (от 25 до 55% битума) и канифоли с машинным маслом (от 60 до 70% канифоли), патока и химически чистое жидкое стекло. Опыты на вязких жидкостях проводились в стеклянном сосуде. Документация их осуществлялась путем фотографирования с боковых стенок и сверху сосуда. Для каждого опыта было выполнено в среднем 30—40, иногда 80 кадров. Изменение формы, размеров куполов и скорость их роста фиксировались масштабными линейками и секундомером.

В последующих опытах с целью большего приближения к природным условиям деформации упруго-пластичных пород использовались твердые пластичные материалы. В этом случае нормальной силы тяжести для их перемещения оказалось недостаточно. Применение центрифуги обеспечило движение твердых материалов благодаря действию центробежной силы, которая использовалась для имитации силы тяжести. Центробежной силе легко придать значение, в несколько сотен и тысяч раз превышающее гравитационную силу, что позволяет применять при моделировании, без нарушения подобия, более прочные и соответственно более вязкие материалы.

В опытах использовались центрифуги следующих марок: ЦЛС-2 лабораторная стационарная с максимальной скоростью вращения при роторе-крестовине 2100 об/мин, которой соответствует на дне стакана центробежная сила до 1250g; ЦРЛ-1 лабораторная рефрижераторная со скоростью вращения 3000 об/мин и центробежной силой 2500g (при роторе-крестовине). Диаметр стакана центрифуги в обоих случаях 72 мм.

В опытах с центрифугой при расчете вязкости эквивалентных материалов учитывалась величина центробежной силы (среднее значение 1000g). Расчеты показали, что эквивалентные материалы в этом случае могут иметь вязкость, равную примерно 10^5 пуз. Такой вязкостью обладают твердые пластичные материалы. После ряда попыток для опытов были отобраны каучук марки СКТВ-1 и замазка.

Вязкость эквивалентных материалов исследовалась на пластовискосиметре В. П. Павлова, на ротационном вискозиметре РВ-8 системы профессора М. П. Воларовича и на прессе для сжатия образцов (Оскина, 1963). Было выполнено более 20 таких исследований, что дало возможность построить кривые зависимости вязкости от напряжения (см. стр. 63). Характер кривых указывает, что патока, жидкое стекло, смесь битума с нигролом относятся к категории аномальных вязких жидкостей (Михайлов, Ребиндер, 1955), а каучук и замазка — к категории условно пластичных тел, отличающихся большей вязкостью, а также предельным напряжением сдвига. Замазка обладает неоднородной вязкостью, в связи с этим при подготовлении модели замазка тщательно перемешивалась и употреблялась только свежеприготовленной.

Применение при моделировании твердых материалов позволяет создавать более сложные слоистые модели, на которых процесс перемещения представлен детальнее и нагляднее, и останавливать эксперимент на любой стадии. Характер деформации на пластичных материалах наблюдали в срезах (горизонтальных и вертикальных) и при снятии слоя тяжелого материала, так как пластичные материалы сохраняют приобретенную деформацию. Характерные для соляных структур разрывные нарушения на каучуке и замазке моделируются плохо из-за большой их пластичности, а также, видимо, малых величин напряжений, развивающихся в моделях.

В опытах на вязких жидкостях наблюдаются все стадии процесса перемещения в одной модели. На твердых материалах разные стадии процесса перемещения можно фиксировать лишь на ряде однотипных моделей при разной длительности их вращения в центрифуге. Опыты проводились по сериям (см. стр. 65). Достоверность полученных результатов подтверждается тем, что опыты повторялись два-три раза и основные результаты моделирования на вязких жидкостях и твердых пластичных материалах совпадали. Основные формы куполов и закономерности процесса, выявленные при моделировании, приведены на графиках, в таблицах и фотографиях.

Сопоставление результатов опытов со строением и историей развития соляных куполов в Прикаспийской впадине показывает, что форма соляных куполов и их развитие в природной обстановке и в моделях определяются одинаковыми факторами. Моделирование помогло объяснить также впервые ряд особенностей строения соляных структур Прикаспийской впадины.

I. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СОЛЯНЫХ СТРУКТУР В ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЕ

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ

Прикаспийская впадина представляет собой юго-восточную глубоко погруженную часть Восточно-Европейской платформы, для которой характерны наибольшие глубины залегания фундамента, огромные мощности платформенного чехла и широкое развитие соляной тектоники, обусловленной наличием соленосной формации раннепермского возраста. Она является одним из наиболее крупных регионально нефтегазоносных бассейнов мира.

Геологическое строение этого региона расшифровано еще недостаточно. Особенно это касается глубинной тектоники и проблем соляной тектоники (морфологии, закономерностей размещения и формирования соляных структур). Тектоническое строение впадины, связь соляного тектогенеза с ее формированием, закономерности образования и пространственного размещения соляных структур имеют большой практический интерес, поскольку с соляными структурами связаны залежи нефти и газа.

На севере и северо-западе от доцембрийской Восточно-Европейской платформы с приподнятым залеганием фундамента Прикаспийскую впадину отделяют крупные уступы фундамента. На севере — это Красновский субширотный бортовой уступ, зафиксированный региональными сейсмическими работами по профилю VII восточнее г. Уральска. По данным профиля, на расстоянии 30 км поверхность фундамента погружается с севера на юг с отметки —4500 до —8300. Крутой перепад глубин фундамента на профиле совпадает с гравитационной ступенью, разделяющей поля положительных и отрицательных аномалий силы тяжести приподнятой части Восточно-Европейской платформы и Прикаспийской впадины.

В слоях палеозоя перепаду глубин фундамента соответствует Жадовский уступ, установленный по изменению глубин залегания верхнепермских отражающих горизонтов. По мезозою и палеогену, согласно данным геологической съемки (Кожевников, 1958), здесь выделяется Токаревский сброс, амплитуда которого с запада на восток уменьшается с 600 до 200 м. Этот сброс, по И. И. Кожевникову, на востоке сочленяется с Илекской флексурой, разделяющей Прикаспийскую впадину и опущенный Соль-Илецкий блок Восточно-Европейской платформы. Илекская флексура отмечается в отложениях юры и мела; по поверхности фундамента ей отвечает глубинный уступ, выраженный гравитационной ступенью.

На западе бортовой уступ прослежен до района Куриловки, где его простирание изменяется с широтного на юго-западное. Дальше он проходит вдоль западного борта впадины и называется Волгоградским. На севере и западе впадины бортовой уступ является границей распространения соляных куполов.

С востока Прикаспийская впадина ограничена герцинским складчатым сооружением Урала, с юга — эпигерцинской платформой с потребленными субширотными герцинидами и складчатым сооружением

вала Карпинского. Согласно представлениям одних геологов (Чарыгин, Казаков и др., 1958; Арабаджи, Васильев и др., 1965), эти структуры сочленяются с Прикаспийской впадиной посредством краевых прогибов, другие (Яншин, 1945, 1955; Неволин, 1961, 1965; Журавлев, 1960; Эвентов, 1964; Кожевников, 1961; Соловьев, Голов, 1966а и др.)

считают что сочленение этих структур происходит по системе краевых швов (рис. 1). Один из краевых швов, ограничивающий с востока впадину, по данным И. И. Кожевникова и Б. А. Соловьева, протягивается с севера на юг примерно до широты станции Эмба и здесь затухает. В 60 км восточнее станции Эмба на простирании Сакмарско-Кокпектинского разлома расположен другой краевой шов (Журавлев, 1964).

Южная граница впадины определяется разломами, установленными на северных склонах вала Карпинского и Южно-Эмбенского поднятия. В этих районах со стороны впадины к разлому примыкает зона резкого выклинивания гидрохимической толщи перми и нижнепермских подсолевых отложений.

К северо-восточной части Прикаспийской впадины примыкает южное окончание Предуральского краевого прогиба, западная граница которого, по данным гравиразведки, фиксируется зоной сгуще-

ния изоаномал. Сейсморазведкой установлено, что этой гравитационной ступени соответствует глубинный разлом, к западу от которого

Рис. 1. Схема расположения структурных зон Прикаспийской впадины. Составлена по данным А. А. Голова и Б. А. Соловьева (1966)
 1 — область приподнятого залегания фундамента Восточно-Европейской платформы; 2 — Уральская складчатая система; 3 — южные субширотные герциниды под мезо-кайнозойским осадочным чехлом; 4 — вал Карпинского; 5 — тектонические нарушения в платформенном чехле; 6 — главнейшие разломы фундамента (достоверные и предполагаемые); 7 — глубинные структурные швы; 8 — флексуры; 9 — Прикаспийская впадина; 10 — границы зон соляных структур. Структурные зоны: I — Южно-Эмбенская; II — Сарпинско-Енотаевская; III — Приволжская прибрюговая; IV — Узени-Илекская; V — Центральная (Эльтон-Индеро-Челкарская); VI — Хобдинская; VII — Эмбенская; VIII — Соль-Илецкий блок; IX — Южное окончание Предуральского краевого прогиба; X — Южный периклинальный прогиб Уральской складчатой системы. Зоны IX и X с позднего триаса стали внешней прибрюговой частью Прикаспийской впадины

располагается Соль-Илецкий блок. К югу Предуральский краевой прогиб, становясь более пологим, как бы растворяется в северной части Прикаспийской впадины.

К востоку от Предуральского краевого прогиба, отделяясь от него глубоко погруженным швом, протягивается Южный периклинальный прогиб Уральской складчатой системы (Яншин, 1955).

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ФУНДАМЕНТА

О глубинном строении Прикаспийской впадины можно судить по результатам геофизических исследований. На гравитационной карте Восточно-Европейской платформы, составленной Е. Ф. Козловой (Неволин, 1961), Прикаспийская впадина выделяется по преимущественному развитию в ее пределах отрицательных аномалий силы тяжести, обусловленных большой мощностью осадочного чехла и наличием соленосной формации.

Гравитационное поле Прикаспийской впадины со всех сторон ограничено положительными аномалиями силы тяжести. На западе

и севере они отвечают участкам Восточно-Европейской платформы с относительно приподнятым залеганием докембрийского фундамента; на востоке — герцинидам Урала. Южному ограничению гравитационного поля впадины соответствует Южно-Эмбенский, Северо-Каспийский и Астраханский максимумы, которыми оно отделено от гравитационного поля эпипалеозойской Туранской плиты. На севере и северо-западе переход от положительного гравитационного поля Восточно-Европейской платформы к отрицательному полю Прикаспийской впадины фиксируется гравитационной ступенью, протягивающейся узкой полосой (от 10 до 30 км шириной) от Волгограда до Оренбурга.

Внутри впадины в гравитационном поле выделяются крупные минимумы и максимумы, расположение которых имеет как бы кольцевое строение. Первое, внешнее кольцо включает области отрицательных региональных аномалий силы тяжести повышенной интенсивности, развитые в прибрежных зонах впадины (Приволжский, Узенский, Илек-Утвинский, Джанакалинский, Актюбинский региональные минимумы силы тяжести). Второе кольцо занимает среднюю часть впадины, включая области отрицательных аномалий силы тяжести и области аномалий, близких к нулю. Внутри этого кольца в центральной части впадины располагаются интенсивные гравитационные максимумы: Хобдинский на востоке и Арапсорский на западе.

В магнитном поле Прикаспийская впадина, по Е. Ф. Козловой (Неволин, 1961), не находит четкого отражения. Для нее характерно слабо аномальное магнитное поле. Центральную часть впадины характеризует весьма спокойное слабо отрицательное магнитное поле, протягивающееся за ее пределы на территорию Рязано-Саратовского прогиба. Эта часть магнитного поля впадины обладает сходством с магнитным полем тех частей Воронежской антеклизы, которые имеют архейский возраст (Соколов, 1962). В широтном направлении через это поле протягивается полоса отрицательных значений ΔT_a , соответствующая зонам региональных гравитационных максимумов Хобдинского и Арапсорского. Слабо отрицательное магнитное поле центральной части впадины с юго-запада, юга и востока обрамлено магнитным поясом повышенной аномалийности.

Материалы магниторазведки свидетельствуют о неоднородном строении фундамента. В. Л. Соколов (1962) и В. С. Журавлев (1964) высказывают предположение об ином характере фундамента в пределах обрамляющего аномалийного пояса по сравнению с центральной частью впадины. По мнению В. Л. Соколова, в пределах этого пояса фундамент впадины имеет саксагонский возраст, а по В. С. Журавлеву — байкальский. Н. С. Шатский еще в 1946 г. предполагал, что на юго-востоке Прикаспийской впадины фундамент имеет рифейский возраст. На северо-западе впадины возраст фундамента карельский.

Характер магнитного поля показывает, что Прикаспийская впадина, видимо, накладывается на различные аномалийные зоны, а ее границы на большей части своего протяжения не зависят от структуры магнитного поля. По-видимому, впадину следует рассматривать как одну из крупных платформенных структур, объединившую ранее разнородные элементы структуры фундамента.

Данные сейсморазведки КМПВ — региональные сейсмические профили (I—XV, II, III, IV и др.) и рядовые сейсмические профили (более 20) дают представление о строении земной коры Прикаспийской впадины и уточняют происхождение наблюдавших здесь региональных гравитационных и магнитных аномалий. Широтный сейсмический профиль IV (рис. 2) показывает, что мощность осадочной толщи увеличивается с востока на запад в сторону Хобдинской зоны, глубины залегания поверхности фундамента возрастают в том же направлении от 15,8 до 17,3 км. На глубине 21,5 км проходит граница, по-видимому,

отвечающая поверхности базальтового слоя; мощность гранитного слоя в пределах Хобдинского участка сокращается.

Глубинное сейсмическое зондирование, выполненное конторой «Спецгеофизика» по профилям Камышин — Бескундук и Калмыково — Актюбинск, однозначно показывает (Соколов, 1970; Фоменко, 1971;

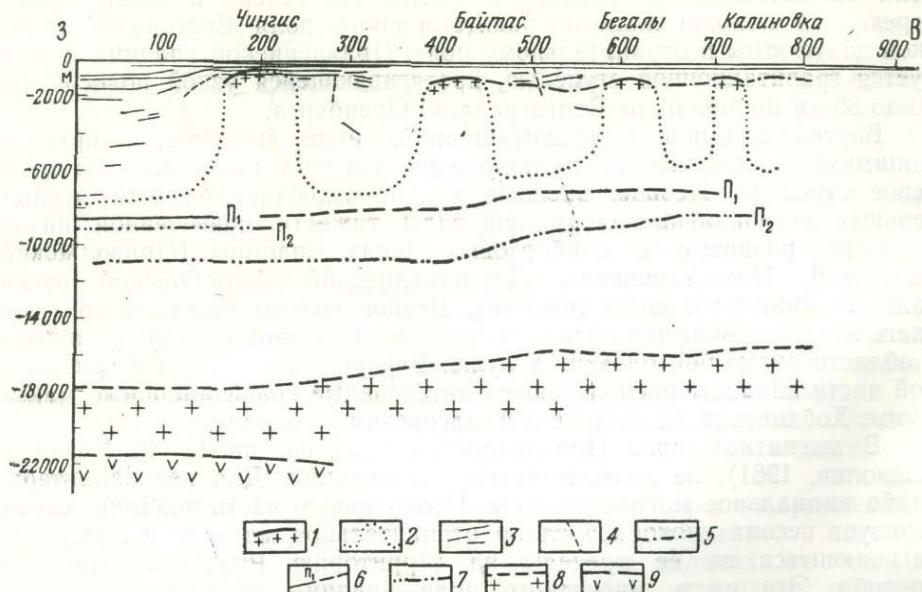


Рис. 2. Широтный сейсмический профиль IV КМПВ. По К. Е. Фоменко и др. (1965)

1 — кровля соли на сводах куполов, V_r 4,5 км/сек; 2 — кровля соли в межкупольных зонах и на крутых склонах куполов; 3 — отражающие площадки; 4 — разрывы. Преломляющие границы: 5 — в межкупольных зонах с V_r 4,2—4,8 км/сек; 6 — соответствующая кровле подсолевых отложений с V_r 5—5,2 км/сек; 7 — отвечающая горизонту Π_2 с V_r 5—6 км/сек; 8 — соответствующая поверхности докембрийского кристаллического фундамента с V_r 6,5—6,7 км/сек; 9 — соответствующая поверхности базальтового слоя внутрикристаллической толщи с V_r 6,8—7 км/сек

Кухмазев и др., 1971), что в Прикаспийской впадине в связи с резким погружением фундамента мощность платформенного чехла увеличивается до 20—23 км (рис. 3). В ее внутренних районах, тяготеющих к Хобдинскому и Арасорскому региональным максимумам, мощность консолидированной части земной коры сокращена. Это обусловлено

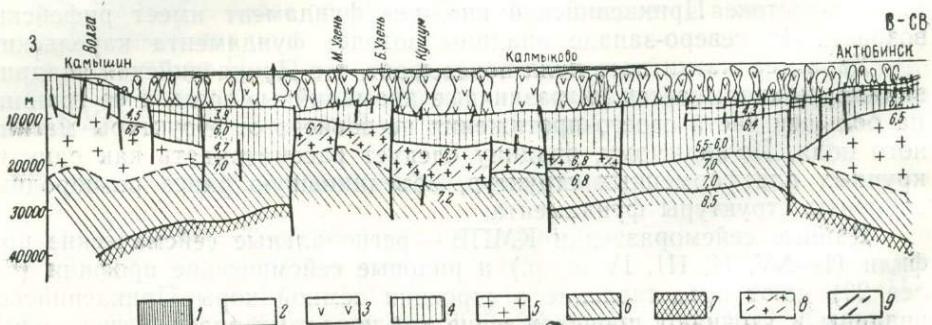


Рис. 3. Сейсмо-геологический разрез Прикаспийской впадины. Составил В. Л. Соколов (1970)

1 — верхний плиоцен; 2 — палеоген, мезозой и верхняя пермь; 3 — соляные штоки и гряды; 4 — подсолевой осадочный слой; 5 — «гранитный» слой земной коры; 6 — «базальтовый» слой земной коры; 7 — верхняя мантия; 8 — существенно базальтифицированный гранитный слой, возможно осадочный; 9 — разломы. Цифры на разрезе — V в км/сек

подъемом верхней мантии до 26—30 км, практически полной переработкой гранитного слоя и сокращением мощности базальтового слоя до 6—9 км. Осадочные образования здесь, вероятно, непосредственно перекрывают базальтовый слой.

В связи с изложенным взгляд на природу Хобдинского и Арасорского гравитационных максимумов, которые раньше связывались с поднятиями фундамента, сейчас изменился. В настоящее время, по данным сейсмических исследований, здесь устанавливаются большие глубины залегания фундамента (до 20—23 км). Гравитационные максимумы объясняются приближением к поверхности фундамента базальтового слоя и неглубоким (для платформенной области) залеганием поверхности Мохоровичича (26—30 км), образующей два крупных выступа. Сейсмические исследования КМПВ и ГСЗ выявили отличия земной коры в областях Хобдинской и Арасорской аномалий от обычного ее строения в пределах платформы. Установленное здесь выклинивание гранитного слоя сближает строение земной коры этих участков Прикаспия со строением краевых и внутриматериковых морей (Мексиканского залива, южной части Каспийского моря, Черного моря и др.).

Исследования конторой «Спецгеофизика» методом МТЗ (электроразведка в модификации магнитотеллурических зондирований) по профилю, проложенному в 1963 г. между оз. Арасор и г. Актюбинском, дают общие сведения о строении поверхности фундамента и осадочного чехла. Метод МТЗ позволил получить представление о характере геоэлектрического разреза центральных районов Прикаспийской впадины вплоть до фундамента. В межкупольных зонах геоэлектрический разрез четырехслойного типа: $\rho_1 < \rho_2 \gg \rho_3 \ll \rho_4$, где $\rho_2 \rightarrow \infty$ и $\rho_4 \rightarrow \infty$ (ρ — сопротивление).

Первый электрический слой (ρ_1) приурочен к низкоомным отложениям мезозоя и кайнозоя; мощность слоя 2000—2800 м в сводовых частях соляных куполов уменьшается. Второй (высокоомный) электрический слой (ρ_2) венчается известняками нижнего триаса и, очевидно, включает отложения перми, карбона и, возможно, верхнего и среднего девона. Мощность слоя 14 км. Третий электрический слой (ρ_3) низкоомный, приурочен, по-видимому, к нижнепалеозойским отложениям; мощность его в западной части впадины достигает 4000 м. Четвертый электрический слой (ρ_4), обладающий бесконечно высокими сопротивлениями, вероятно, соответствует фундаменту; глубина его залегания 10—19 км.

Последующие исследования методом МТЗ (Виленчик, Голубков, 1965) выявили в фундаменте центральной части впадины ряд разломов. По ним в поверхности кристаллического фундамента намечаются опущенные и приподнятые участки типа горстов и грабенов. Наиболее опущенные по фундаменту участки расположены в районе оз. Арасор (до 19 км) и в районе пос. Карагюбек (17 км). Эти впадины оконтурены стратоизогипсами только с севера. Узенький блок имеет сложное строение: в центральной прогнутой его части фундамент залегает на глубине 15,8 км, в южном и северо-западном направлениях он поднимается до 12—13 км. Участок, расположенный между реками Большой Узень и Кушум, характеризуется спокойным залеганием фундамента на глубине 13 км.

В полосе, совпадающей с долиной р. Урала, выявлен резкий перепад глубин фундамента: его поверхность залегает на западе на глубине 16 км, на востоке на глубине 12 км. Между реками Урал и Кушум выделяется крупный Урало-Кушумский грабен. В восточной части Прикаспийской впадины, в районе Джамбайты и Карагульельды, фундамент приподнят до 11 и 8 км, а в Актюбинском Приуралье он располагается на глубине около 16 км. В районе оз. Сарпа, согласно

сейсмическим профилям КМПВ, отмечается прогиб, где фундамент погружен на глубину до 18 км. Этот прогиб продолжается к оз. Эльтон.

К бортам Прикаспийской впадины глубина залегания поверхности фундамента уменьшается до 8—9 км, а на северо-восточном ее борту (*Соль-Илецкий клин*) до 5 км. В пределах северной и западной бортовых зон впадины поверхность кристаллического фундамента, по данным сейсморазведки, резко погружается с глубины 5 км до 8 км, образуя тектонический уступ, который прослеживается от Оренбурга до Волгограда.

По Н. В. Неволину (1965), фундамент северного и западного обрамлений впадины помимо продольных разломов осложнен и радиальными. Таким образом, данные о строении фундамента в центральной части Прикаспийской впадины, полученные лишь в самое последнее время с помощью электроразведки, свидетельствуют о блоковом его строении.

Прикаспийская впадина является платформенной структурой особого типа. Для нее характерны резкое погружение фундамента до 20—23 км (следовательно, большие мощности осадочного чехла), почти полная переработка гранитного слоя и подъем поверхности верхней мантии. По В. С. Журавлеву (1964), Прикаспийская впадина расположена в пределах внешнего юго-восточного угла Восточно-Европейской платформы, наращенного байкальской складчатостью, интенсивно раздробленного и весьма глубоко погруженного. Учитывая приуроченность Прикаспийской впадины к внешнему углу древней платформы и указанные выше специфические ее черты, В. С. Журавлев относит ее к краеугольным или экзогональным впадинам.

СТРОЕНИЕ ПЛАТФОРМЕННОГО ЧЕХЛА

Для изучения структуры осадочной толщи впадины применялись различные геофизические методы: сейсморазведка (МОВ — метод отраженных волн, КМПВ — корреляционный метод преломленных волн и МНРП — метод регулируемого направленного приема); электроразведка методом теллурических токов (ТГ) и гравиразведка. Кроме того, было проведено комплексное геологическое картирование.

Платформенный чехол впадины состоит из трех комплексов: подсолевого, солевого и надсолевого. Надсолевой комплекс подразделяется на нижний (верхнепермско-триасовый), средний (юрско-палеогеновый) и верхний (неоген-четвертичный) этажи. Выделенные комплексы и этажи отвечают крупным этапам формирования впадины.

Возникновение и развитие структур, созданных соляной тектоникой, непосредственно связаны с развитием впадины. Рост соляных куполов происходит на фоне общетектонических движений и отражается в стратиграфическом разрезе надсолевого комплекса. Нижняя граница среднего этажа надсолевого комплекса скользящая, неодинакова по возрасту в разных частях впадины (Геология СССР, т. XXI). На восточной ее окраине несогласие между нижним и средними этажами соответствует основанию триаса, в районе Южной Эмбы — основанию нижней юры, а на междуречье Урала и Волги — подошве средней юры. Нижняя граница верхнего этажа также скользящая.

Подсолевые палеозойские отложения вскрыты скважинами лишь в прибортовых частях Прикаспийской впадины. Представления о вероятном их составе весьма различны. Многие исследователи предполагают, что литолого-фацевые особенности и мощности девона, карбона и нижней перми впадины в общем такие же, как у одновозрастных отложений смежных районов Урала и Поволжья (Васильев, 1968; Неволин, 1961, 1965; Кожевников, 1962а; Соколин, 1964).

В западной и северной частях впадины подсолевой комплекс представлен типичными платформенными, главным образом карбонатными отложениями. На востоке впадины подсолевые образования ранней перми и позднего карбона сложены сероцветными молассами. На юге и юго-востоке в пределах северного склона Южно-Эмбенского поднятия подсолевой разрез представлен платформенными осадками.

Среди докунгурских палеозойских отложений северного обрамления впадины И. И. Кожевников (1962а) выделяет три толщи: 1) пестроцветные немые свиты субконтинентального происхождения, образовавшиеся в рифейско-раннедевонское время преимущественно за счет разрушения выступов кристаллического фундамента, видимо, развитые во впадинах фундамента; 2) преимущественно терригенные морские породы среднего и верхнего девона до подошвы среднефранского подъяруса; 3) преимущественно карбонатные морские породы верхнего девона, карбона и нижней перми до подошвы кунгурского яруса. Э. А. Буш, В. Г. Кузнецов, В. Л. Соколов (1967); Л. Б. Коган и др. (1970); В. Л. Соколов (1970) предполагают вероятность развития во впадине в позднедевонское и каменноугольное время некомпенсированных прогибаний с накоплением толщ доманикового типа, а при их последующей компенсации — песчано-глинистых, в значительной мере субугленосных образований.

Новые данные о развитии впадины в каменноугольное и раннепермское время получены в результате бурения поисковых скважин в пределах ее северо-западного борта на Карпенском участке (Саратовская область, район Красного Кута). По В. Л. Соколову (1970), мощность карбонатной толщи среднего карбона — нижней перми здесь непосредственно за бортовым уступом резко уменьшается с 1200 до 50 м и она замещается преимущественно терригенной толщей темноцветных аргиллитов, песчаников и доломитов с вскрытой мощностью более 370 м. Мощность субугленосной терригенной толщи среднего карбона (верхнебашкирский подъярус и верейский горизонт) увеличивается от 200—250 до 800—850 м в бортовых скважинах. Аналогичное увеличение мощности этих отложений зафиксировано, по данным бурения, на Кисловском участке и на сейсмическом профиле Сарпинско-Тингутинского участка в Волгоградской области.

В разрезах бортовой зоны Саратовского Заволжья субугленосная толща перекрывается терригенной, замещающей карбонатную толщу среднего карбона — нижней перми. Они образуют единую преимущественно песчано-глинистую свиту смешанного фациального состава, мощность которой, по данным сейморазведки, достигает 1500 м. В. Л. Соколов (1970) считает, что «Наблюдаемые соотношения — уменьшение мощности карбонатных частей с фациальным замещением их темноцветными глинистыми породами и развитие мощных терригенных линз характерны для бортов глубоких некомпенсированных седиментацией впадин» (стр. 38). Далее он указывает, что «Полная компенсация нижнепермского, каменноугольного и, возможно, девонского прогибаний состоялась в кунгурский и казанский периоды отложением мощной галитовой формации» (стр. 41).

В центральной части впадины подсолевые отложения, согласно сейсмическим данным, слабо дислоцированы и, по-видимому, достигают мощности 10—12 км. Резкое возрастание мощности подсолевого комплекса, по-видимому, обусловлено присутствием в разрезе толщи додевонских (нижнепалеозойских и, возможно, рифейских) отложений. Это предположение косвенно подтверждается данными одной из скважин, пробуренной в пределах Оренбургского вала, которая прошла по нижнепалеозойским отложениям более 600 м и не вышла из них, а также скв. 7 Карпенской площади, вскрывшей в северо-западной части прибрежной зоны впадины кварциты рифея (?).

Составленные в разное время структурные схемы подсолевого ложа Прикаспийской впадины или ее отдельных частей в значительной мере гипотетичны, построены по разной методике и существенно отличаются одна от другой (Чарыгин и др., 1958; Журавлев, 1960; Калинин, 1963; Соколов, 1964; Неволин, 1961, 1965; Эвентов, 1964; Соловьев, 1966б; Васильев, 1968).

По подсолевому ложу Прикаспийская впадина является глубокой депрессией, осложненной большим количеством крупных и небольших локальных поднятий. В прибортовых зонах впадины подсолевое ложе залегает на глубинах 2—3 км, к центральной ее части оно погружается до глубины 9—10 км. Структуры подсолевого ложа по общему облику относятся к платформенному типу. Это подтверждается сейсмическими данными, согласно которым подсолевые отложения представляют собой толщу с пологим залеганием отражающих границ.

По И. И. Кожевникову, А. А. Голову и Б. А. Соловьеву (см. рис. 1), наиболее прогнутая часть подсолевого ложа располагается между озерами Индер и Челкар и оконтуривается изогипсой минус 9000 м. Эта вытянутая в широтном направлении прогнутая полоса осложнена рядом мульд: Уральской, Карагюбинской и Тамдыкульской, имеющих пологие склоны и расплывчатые очертания. Амплитуда прогибания их не превышает 1000—1500 м. Хобдинскому максимуму соответствует моноклиналь с погружением пород подсолевого палеозоя от глубин 7,5 до 9 км. Аракорский максимум располагается на территории, где глубина поверхности подсолевого палеозоя составляет 9 км.

Восточная часть впадины характеризуется большей расчлененностью рельефа этой поверхности. С востока на запад здесь отмечается общее погружение подсолевых отложений от 2—2,5 до 5 км. Распространение их на востоке ограничено региональным сбросовым нарушением. В пределах северного борта, по данным сейсморазведки, подсолевые отложения от Жадовского уступа к центру впадины на протяжении 4—5 км сначала погружаются на глубину 2—3,5 км, а южнее на расстоянии 40—50 км залегают на глубине 6—6,5 км. Такой же характер залегания характеризует подсолевые отложения и по северо-западному борту впадины, вплоть до Волгограда.

Повышенное положение фундамента в пределах Соль-Илецкого блока отражается и в поверхности подсолевых отложений. От Прикаспийской впадины этот блок отделен четко выраженным бортовым уступом, а в отдельных местах — сбросовым нарушением.

В пределах юго-восточной части впадины область распространения докунгурских отложений отделяется от Южно-Эмбенского краевого погребенного поднятия региональным тектоническим нарушением. Структура подсолевых отложений впадины представляет здесь моноклиналь с падением пород на север. Вблизи разрывного нарушения отмечается крутое погружение подсолевых отложений с глубин от 2,5 до 5 км, далее в сторону впадины — более пологое. Наклону подсолевого ложа на север здесь соответствует общее погружение поверхности фундамента на юг (Кунин, Сапожников, 1965). Подобный разнонаправленный наклон подсолевого ложа и поверхности фундамента характерен и для Астраханского регионального гравитационного максимума.

В юго-западной части Прикаспийской впадины выделяются два крупных тектонических элемента: Сарпинский прогиб и Енотаевско-Замьяновское поднятие (Кононов и др., 1967).

Н. А. Калинин (1963), В. С. Журавлев (1960), В. Л. Соколов (1964) и Я. С. Эвентов (1964) считают, что подсолевое ложе Прикаспийской впадины осложнено разрывными нарушениями и строение его, вероятно, является блоковым. По мнению Я. С. Эвентова, разломные нарушения в подсолевом ложе образуют систему грабенов и горстов субмеридионального простирания, которые и определяют в значитель-

ной степени рельеф его поверхности. В междуречье Урала и Волги Я. С. Эвентов выделяет Ащеузенский, Малоузенский, Большеузенский и Калмыковский региональные сбросы субмеридионального простирания и разделяющие их Урдинский прогиб, Аралсорский грабен, Узенский горст и Центральный прогиб. Почти все крупные нарушения, прослеженные по фундаменту, отражены и в палеозойских подсолевых отложениях, но амплитуда смещения в них значительно меньше.

Солевой комплекс. В Прикаспийской впадине возраст его кунгурский. В центральной ее части стратиграфический объем солевой толщи расширяется и здесь она, по-видимому, захватывает частично более древние отложения перми (Неволин, 1965). В восточных районах впадины верхняя граница солевого комплекса поднимается до казанского яруса верхней перми (Журавлев, 1969, 1972 а, б).

Отложения солевого комплекса обычно залегают на большой глубине, выходя на поверхность лишь в ядрах открытых соляных куполов в центральной части впадины и местами в бортовых ее частях. Максимальная глубина залегания подошвы соленоносной толщи (до 10 км) наблюдается во внутренних районах впадины, т. е. там, где отмечается наибольшая глубина залегания подсолевого ложа.

Максимальная первичная мощность солевого комплекса во внутренних районах впадины, по Г. Е.-А. Айзенштадту и Э. И. Герштейн (1963), достигала 3—4 км, по Л. Ф. Волчегурскому и В. С. Журавлеву (1965) несколько более 4 км. Впоследствии в результате перетока соли мощность ее в межкупольных пространствах резко сократилась, а по соседству образовались соляные штоки до 3—7 км, а иногда и до 9 км высотой.

Солевая толща представлена в основном каменной солью (75—95%) с подчиненными прослоями сульфатного и терригенного материала. К бортам впадины мощность солевой толщи уменьшается до 1 км и меньше, и ее почти чисто соляная фация замещается окраинной, сульфатно-соляной. В последней появляются прослои терригенных и карбонатных пород. Так, на юго-востоке, на куполе Азнагул и в урочище Тугаракчан разрез кунгура представлен терригенно-карбонатно-сульфатными породами мощностью до 280 м. Несколько южнее в наиболее приподнятой части Южно-Эмбенского поднятия отложения кунгура полностью выклиниваются. На правобережье Волги эти отложения представлены сульфатными породами с прослоями и линзами карбонатных (ангидрито-доломитов, мергелей, доломитизированных известняков) и терригенных пород (Ермаков, 1971).

В самое последнее время нижнепермские отложения, представленные красноцветными породами с прослоями ангидридов (предположительно кунгурского возраста), на глубине от 6630 до 6782 м вскрыты Аралсорской сверхглубокой скважиной. На глубине 6782 м бурение скважины приостановлено. Эта скважина расположена в пределах Аралсорского гравитационного максимума и в центре межкупольной депрессии. В подавляющей части межкупольных депрессий, разобщенных соляными штоками, соль целиком выжата и надсолевые породы находятся в непосредственном контакте с подсолевыми отложениями (Соколов, Буш, Кричевский, 1965).

Надсолевой комплекс. Отложения этого комплекса перекрывают соляные массивы закрытых куполов и выполняют чашеобразные межкупольные депрессии. Развитие форм соляной тектоники обусловило повсеместное сокращение разрезов надсолевых толщ на куполах и их послойное разрастание в межкупольных депрессиях. Максимальные мощности отложений надсолевого комплекса до 9—10 км отмечаются в бессолевых (сквозных, по В. Л. Соколову, 1965) межкупольных депрессиях внутренних районов. Эти цифры характеризуют здесь и глубины залегания подсолевого ложа.

В. Л. Соколов (1970) указывает, что общая мощность надсолевых толщ в межкупольных депрессиях не отражает амплитуды прогибания впадины за время их отложения. Эта амплитуда меньше мощности надсолевых толщ в межкупольных депрессиях на величину мощности соли, выжатой из-под них в процессе роста соляных куполов и замещенной надсолевыми отложениями. К бортовым частям впадины мощность отложений надсолевого комплекса уменьшается, что отмечается как в межкупольных депрессиях, так и на сводах куполов. Наиболее полное представление о строении надсолевого комплекса дают разрезы Аралсорской сверхглубокой скважины (табл.1) и других районов впадины (Геология СССР, т. XXI, 1970).

Нижняя часть разреза надсолевого комплекса Прикаспийской впадины представлена верхнепермскими и триасовыми отложениями, первоначальное залегание которых повсеместно нарушено соляной тектоникой.

Верхнепермские отложения прослеживаются на периферии соляных куполов и выполняют межкупольные депрессии. На поверхность они выходят в нескольких пунктах Прикаспийской впадины (в районе оз. Индер, возвышенностей Чапчача и Худайберген и др.), обычно же залегают на значительной глубине и вскрываются скважинами лишь на крутых склонах соляных массивов и в некоторых межкупольных депрессиях. Полная мощность их в межкупольных депрессиях внутренней части впадины достигает 3,5—4 км.

В южной части междуречья Урала и Волги отложения казанского яруса представлены морскими и лагунными глинисто-карbonатными породами мощностью до 1 км. В восточной части впадины и в районе Южной Эмбы к нему принадлежат красноцветные песчано-глинистые породы континентального происхождения. Значительно большая часть разреза верхней перми, относящаяся к татарскому ярусу, повсеместно сложена красноцветными и пестроцветными в основном континентальными песчано-глинистыми породами. Мощность их в межкупольных депрессиях внутренней части впадины достигает 2,5 км. В районах Южной Эмбы и восточной прибрежной части впадины отложения татарского яруса несогласно залегают на размытых слоях казанского яруса.

Триасовые отложения также участвуют в строении соляных куполов и межкупольных депрессий. Они обнажены на куполах Индер, Баскунчак и некоторых других. На многих куполах отложения триаса вскрыты скважинами, здесь они нередко контактируют с соляными массивами. В составе отложений триаса выделяются: нижний триас (ветлужская и баскунчакская серии), предположительно средний триас (по данным В. В. Липатовой, 1967) и верхний триас, представленный в основном кейпером и отчасти рэтом.

На территории Прикаспийской впадины в первой половине раннетриасового времени накапливались красноцветные песчано-глинистые отложения ветлужской серии. В баскунчакском веке (во второй его половине) условия осадконакопления изменились и происходило накопление глинисто-карбонатных пород морского происхождения. На северо-востоке они замещаются континентальными отложениями. В течение позднего триаса почти на всей территории впадины накапливались континентальные отложения озерного, дельтового и речного происхождения.

Максимальные мощности нижнетриасовых отложений до нескольких километров отмечаются в межкупольных депрессиях междуречья Урала и Волги. Мощность верхнего триаса в пределах восточной части впадины измеряется первыми сотнями метров, в окраинных частях впадины и в Актюбинском районе она резко сокращается и измеряется лишь сотнями метров. Отложения баскунчакской серии на

Таблица I

Схематический разрез Аралсорской сверхглубокой скважины
Составлен автором, по Ю. М. Васильеву, (1968) и в нижней части (с юры), по новым
данным коллектива геологов МИНХ и ГП

Система	Отдел	Ярус (серия)	Интервалы, м	Литологический состав
Четвертичная			0—85	Пески, супеси, суглинки глины
Неогеновая	Верхний плиоцен	Апшеронский	85—295	Мергели, глины, алевролиты, алевриты и пески
		Акчагыльский	295—500	Глины, мергели
Палеогеновая	Эоцен		500—870	Глины с прослоями мергелей
	Палеоцен		870—1076	Глины опоковидные, алевролиты
Меловая	Верхний	Датский	1076—1125	Мергели, глины
		Маастрихтский	1125—1353	Мел, глины опоковидные
		Кампанский	1353—1469	Известняки с прослоями мергелей
		Сantonский	1469—1534	Мергели, известняки
		Туронский	1534—1584	Глины серые
		Сеноманский	1584—1637	Глины темно-серые
	Нижний	Альбский	1637—1826	Глины, алевролиты, песчаники
		Аптский	1826—1969	Глины, алевролиты
		Неоком	Баррем-готерив-валанжин	Глины алевритистые
Юрская	Верхний	Нижний волжский	2116—2185	Известняки, прослои песчаников и мергелей
		Кимериджский	2185—2250	Известняки, глины, мергели
		Оксфордский	2250—2320	Глины, мергели
		Келловейский	2320—2417	Глины, алевролиты
	Нижний (?) и средний		2417—2649	Песчано-глинистые породы
	Верхний		2649—3262	Глинисто-алевритовые пестроцветы, характерны «линьяльные» зеленоватые, оранжевые и красноватые цвета
Триасовая	Средний и верхний		3262—3328	Глинисто-алевритистые сероцветы
	Нижний	Баскунчакская	3328—3725	Глинисто-известковистые породы

Система	Отдел	Ярус (серия)	Интервалы, м	Литологический состав
Триасовая	Нижний	Ветлужская	3725—5492	Терригенные, преимущественно красноцветные породы
Пермская	Верхний	Татарский	5492—6042	Красноцветные песчано-глинистые породы с прослоями сероцветных
		Казанский	6042—6630	Красноцветные песчано-глинистые породы с прослоями известняков
	Нижний (?)	Кунгурский (?)	6630—6782 (забой скважины)	Красноцветные породы с прослоями ангидритов

междуречье Урала и Волги, вскрытые многочисленными скважинами в присводовых частях куполов, залегают с угловым несогласием на вершинах соляных массивов и в кровле размыты.

Во внутренних частях впадины граница между отложениями верхней перми и триаса, а также триаса и юры точно не установлена. Верхнепермские и нижнетриасовые отложения здесь близки по составу, а верхнетриасовые и нижнеюрские образуют единую аралсорскую свиту. Со среднеюрских континентальных отложений здесь, по-видимому, начинается средний этаж надсолевого комплекса, который с размывом и угловым несогласием залегает на различных горизонтах триаса, до нижнего триаса включительно. В восточной прибортовой части впадины этот этаж начинается нижнетриасовыми отложениями. В сводах куполов Кенкияк, Мортук, Башенкуль они залегают с угловым и стратиграфическим несогласием на отложениях кунгурского яруса, а на крыльях куполов и в межкупольных депрессиях на размытой поверхности пород верхней перми. Они с размывом перекрываются здесь отложениями нижней и средней юры.

Отложения юрской системы в Прикаспийской впадине распространены повсеместно, но на поверхность выходят лишь в сводах немногочисленных, наиболее приподнятых соляных куполов (Индер, Эльтон и др.). Они отсутствуют на присводовых частях тех куполов, вершины соляных массивов которых подверглись размыву в предмеловое время, а также на открытых куполах, соляные массивы которых были обнажены при предверхнеплиоценовом срезе.

Нижнеюрские отложения развиты в межкупольных депрессиях внутренней части впадины и входят в состав сероцветной песчано-глинистой континентальной толщи аралсорской свиты. Аналоги последней имеются в разрезах Южной Эмбы и восточной прибортовой части впадины. В сводах соляных куполов внутренней части впадины обычно наблюдаются только отложения средней юры, залегающие с эрозионным несогласием на различных горизонтах баскунчакской серии нижнего триаса. В составе песчано-глинистых, в основном континентальных, и, как правило, угленосных отложений средней юры выделяются отложения байоса, бата и, условно, аалена. В байосе в пределах Прикаспийской низменности существовал морской бассейн.

Следует отметить, что на некоторых соляных куполах Южной Эмбы нижние толщи юры в связи с предверхнеплиоценовым и особенно преднеокомским размывом выпадают из разреза и отложения неокома залегают непосредственно на триасе. В восточной прибортовой части

впадины отложения нижней юры на соляных куполах залегают с угловым несогласием на различных горизонтах триаса или даже непосредственно на соляных массивах куполов. В межкупольных депрессиях этого района они обычно перекрывают отложения баскунчакской серии нижнего триаса, а западнее залегают на верхнетриасовых слоях.

Морские отложения верхней юры при повсеместном распространении в Прикаспийской впадине обнажены весьма редко. На сводах соляных куполов они, особенно их доволжские горизонты, нередко полностью размыты. О былом их распространении здесь свидетельствуют находки фауны из этих слоев в фосфоритовых горизонтах основания волжского яруса или в подошве неокома (в разрезах, где размыты и волжские слои). На крыльях соляных куполов они уходят под нижнемеловые отложения, а в межкупольных депрессиях погружаются на значительную глубину. Пока верхнеюрские отложения вскрыты скважинами только в нескольких межкупольных депрессиях. Наиболее изучены из них слои волжского яруса.

Отложения кимериджа, оксфорда и келловея изучены детально лишь в отдельных районах. Морские отложения верхней юры от келловея до волжского яруса повсеместно являются мелководными, песчано-глинисто-карбонатными. Разрезы этих отложений почти никогда не бывают полными. То одни, то другие зоны и даже ярусы вследствие местных тектонических причин из разреза выпадают. Особенно широко распространено несогласие в основании волжского яруса, который на куполах Прикаспийской впадины нередко лежит на самых различных горизонтах более древних слоев. В конце юрского времени восходящие тектонические движения фиксируются повсеместным выпадением из разреза верхнего волжского яруса.

Отложения меловой системы на территории впадины занимают более обширные площади, чем отложения любой из более древних систем. Они широко распространены на предверхнеплиоценовой поверхности среза к востоку от р. Урала и принимают здесь участие в строении крыльев куполов и межкупольных депрессий. К западу отсюда они выходят на эту поверхность только местами, на участках, призывающих к соляным массивам куполов, а также в сводах некоторых куполов, закрытых при предверхнеплиоценовом срезе. В юго-восточной части впадины, за р. Эмбой, меловые отложения постепенно погружаются под сплошной покров палеогена.

В Прикаспийской впадине повсеместно выделяются отложения всех ярусов меловой системы. Отложения нижнего мела представлены песчано-глинистыми породами, а верхнего мела в большей части карбонатными и в меньшей степени терригенными. В западной и центральной частях впадины отложения меловой системы являются морскими, относительно глубоководными. На большей восточной ее части распространены морские, относительно мелководные, а в нижнем мелу здесь в отдельных районах накапливались континентальные образования.

Нижняя граница меловой системы вследствие трансгрессивного залегания неокома на средне- и верхнеюрских породах является резкой. Отмечается несогласие между аптом и барремом, а также в основании турона, сантоном и маастрихтского ярусов. В основании турона и сантоном прослеживаются фосфоритовые горизонты.

Отложения палеогена во впадине распространены довольно широко: они прослеживаются на ее западной, южной и восточной окраинах, выполняют межкупольные депрессии и компенсационные мульды во внутренних частях впадины и развиты в грабенах, осложняющих своды соляных куполов. В разрезе палеогена выделяются отложения палеоцена, эоцена и олигоцена. Песчано-глинисто-опоковидные отложения палеоцена повсеместно являются морскими осадками. Песчано-глинистые слои эоцена и олигоцена представлены морскими и

континентальными образованиями. В основании отложений палеоцена наблюдается прослой фосфоритов.

Уникальный по полноте и мощности разрез палеогена вскрыт скважиной в Тукбайской компенсационной мульде куполов Бектеньоба — Барханный, расположенных на правобережье р. Урала к западу от оз. Индер. В этой скважине мощность отложений палеоцена равна 261 м, эоцен — 1460 м и олигоцена — 798 м (Васильев и др., 1969).

Палеогеновые отложения венчают средний юрско-палеогеновый этаж надсолевого комплекса. Общая мощность отложений этого этажа, достигающая 2,5 км, вдвое меньше мощности нижнего верхнепермско-триасового этажа надсолевого комплекса. Неогеновые отложения начинают верхний (неоген-четвертичный) этаж надсолевого комплекса.

Неогеновые отложения развиты главным образом в междуречье Урала и Волги и представлены морскими и континентальными фациями миоцена и верхнего плиоцена.

Миоцен весьма ограниченно распространен. Морской миоцен установлен в Абжельской (чокракский горизонт мощностью 40 м) и Тукбайской (аномально большая мощность нижнего миоцена — 304 м, среднего и верхнего миоцена — 714 м) компенсационных мульдах (Васильев и др., 1969). Пяtna миоцена (сарматы) обнаружены во многих пунктах восточной части Прикаспийской впадины. Они развиты здесь в присводовых частях куполов, в грабенах и компенсационных мульдах, а также в межкупольных депрессиях.

Несколько шире развиты красноцветные континентальные образования миоцена. В восточной части впадины они сохранились в ряде мезозойских мульд оседания, в грабенах куполов, а в западной части впадины — в Тукбайской компенсационной мульде, на куполах Челкар, Санкебай — Круглый и др. Отложения миоцена залегают несогласно на различных горизонтах палеогена и мезозоя.

Верхнеплиоценовые отложения впадины представлены акчагыльским и апшеронским ярусами.

Отложения акчагыла вскрыты под слоями апшерона или под четвертичными отложениями многочисленными скважинами на междуречье Урала и Волги и восточнее р. Урала. Они выполняют предверхнеплиоценовые эрозионные врезы и залегают с размывом на отложениях палеогена, мезозоя и перми, иногда миоцена. В центральной части междуречья Урала и Волги отложения акчагыла сложены песчано-глинистомергелистыми породами мощностью до 200 м и имеют морское происхождение, а у северной границы своего распространения (за пределами области) они замещаются континентальными образованиями. Во вдавленной компенсационной мульде купола Новобогатинск — Сугур, расположенного в самых низовьях р. Урала, мощность акчагыла резко увеличена и достигает 1650 м (Авров и др., 1965; Журавлев, 1971).

Апшеронские отложения занимают меньшую площадь. Как и отложения акчагыла, они выполняют древние эрозионные ложбины, возникшие еще до акчагыльской трансгрессии. Апшеронский ярус сложен толщей переслаивания глин, мергелистых глин, песков и алевритов. В северо-восточной части междуречья Урала и Волги эти морские отложения постепенно сменяются пресноводными. Мощность апшерона в центральной части Прикаспийской низменности достигает 300—400 м. Огромная мощность апшерона, превышающая 1270 м, зафиксирована в компенсационной мульде купола Новобогатинск — Сугур (Авров и др., 1965). Контакт отложений апшеронского и акчагыльского ярусов отчетливый и сопровождается следами размыва.

Отложения четвертичной (антропогеновой) системы широко распространены во впадине, практически перекрывают почти всю ее территорию. Они представлены морскими и континентальными фациями. Первые развиты в Прикаспийской низменности и в районах, приле-

гающих к Каспийскому морю, и представлены песчано-глинистыми породами бакинской, хазарской, хвалынской и новокаспийской трансгрессий. Наибольшие мощности четвертичных отложений (400—600 м) наблюдаются в центральной части впадины. Общая мощность верхнего (неоген-четвертичного) этажа надсолевого комплекса составляет 700 м. Уникальный разрез верхнеплиоценовых и четвертичных отложений наблюдается в компенсационной мульде купола Новобогатинск—Сугур, где их суммарная мощность достигает 3500 м (Васильев и др., 1970).

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ ПО СОЛЕВОМУ И НАДСОЛЕВОМУ КОМПЛЕКСАМ

Тектоника солевого и надсолевого комплексов Прикаспийской впадины определяется пластическими деформациями солевой толщи. Проявление этих деформаций связано с неустойчивым расположением легкой соли под более тяжелыми надсолевыми породами, т. е. с инверсией плотностей. В результате гравитационной неустойчивости тяжелые надсолевые породы стремятся опуститься вниз, а легкая соль — подняться вверх. Перемещение начинается с того момента, когда мощность толщи надсолевых пород достигнет величины, достаточной для создания необходимого гравитационного давления на соль. Пластические свойства соли помогают этому перемещению. Наращивание со временем мощности отложений надсолевого комплекса неизбежно должно вызвать усиление интенсивности соляной тектоники.

Причины возникновения первичных соляных внедрений, видимо, были различными и могли определяться неровностями подсолевого ложа, различиями в первичной мощности солевой толщи и неоднородностью ее состава, неравномерной мощностью и неоднородностью состава надсолевых отложений.

В начале своего образования соляные внедрения формируются в виде «соляных подушек», которые разделены первичными компенсационными мульдами. При развитии процесса перемещения первичные соляные внедрения — «соляные подушки» приобретают форму соляного ядра. В Прикаспийской впадине по отношению к современной и предверхнеплиоценовой поверхности среза, в зависимости от степени прорыва соляными ядрами (массивами) надсолевых толщ, соляные купола подразделяются на скрытопрорванные (закрытые) и прорванные (открытые).

Среди скрытопрорванных различаются купола, соляные ядра (массивы) которых частично или полностью прорывают верхнепермско-триасовые слои нижнего структурного этажа и различные горизонты юрско-палеогенового (среднего) структурного этажа. Ядра прорванных соляных куполов имеют столбообразную или грибообразную форму, в последнем случае им свойственны навесы или карнизы. Характер соляного массива (соляного ядра) определяет особенности строения поднятий в надсолевых отложениях.

Соляные купола Прикаспийской впадины разделены межкупольными депрессиями и сопровождаются компенсационными мульдами (вдавленными или сопряженными), а иногда мульдами оседания (напоженными или экранированными). На глубине соляные ядра (массивы) куполов соединяются соляными перешейками и образуются протяженные соляные массивы. В одних случаях соляные купола группируются вокруг межкупольных депрессий, что отражается в ячеисто-сотовом рисунке их расположения, а в других — они располагаются в виде линейных цепочек, подчеркивая этим связь с разрывной тектоникой подсолевого ложа.

Черты тектоники солевого и надсолевого комплексов резко отличаются от тектоники подсолевого ложа. Подсолевая тектоника просве-

чивает сквозь мозаику локальных структур, созданных соляной тектоникой, определяя возникновение, форму и характер размещения соляных куполов в пределах впадины. По особенностям строения солевого и надсолевого комплексов резко противопоставляются внутренние и периферические части впадины. От бортовых частей к внутренним районам впадины в соответствии с увеличением глубины залегания подсолевого ложа мощности соли и надсолевых отложений увеличиваются, соляная тектоника усложняется.

Самостоятельной частью является северо-восточное и восточное обрамления впадины, в пределах которых формирование соляных куполов связано с образованием в позднем карбоне — раннем триасе Предуральского краевого прогиба и Южного периклинального прогиба Уральской складчатой системы. В позднем триасе эта территория стала внешней прибрежной частью Прикаспийской впадины.

В пределах каждой из указанных частей выделяется несколько зон с различными типами соляных куполов. На этой основе проводилось тектоническое районирование Прикаспийской впадины.

Выделены: в периферических частях впадины — Южно-Эмбенская прибрежная зона слабо развитых солянокупольных структур, Сарпинско-Енотаевская зона, Приволжская прибрежная зона соляных антиклиналей (валов), Узени-Илекская зона линейно ориентированных соляных куполов; во внутренней части впадины — Центральная зона (Эльтон-Индеро-Челкарская) преимущественно прорванных соляных куполов, Хобдинская зона с западной и восточной подзонами, Эмбенская зона преимущественно скрытопрорванных соляных куполов; в пределах северо-восточного и восточного обрамлений впадины — зоны Соль-Илецкого блока, южного окончания Предуральского краевого прогиба и Южного периклинального прогиба Уральской складчатой системы (Калинин, 1958; Косыгин, 1950, 1960; Айзенштадт, 1959; Неволин, 1961, 1965; Кожевников, 1964; Соловьев, 1966а, б; Журавлев, 1960, 1963, 1964; Журавлев, Волчегурский, 1965 и др.).

Различие в строении соляных структур указанных зон связано с особенностями строения поверхности подсолевого ложа. При выделении зон за основу (с небольшими изменениями) принята «Схема тектонического строения Прикаспийской впадины» И. И. Кожевникова и Б. А. Соловьева (1966 г.). В Приволжско-Илекской зоне этих авторов в соответствии с данными, приведенными в томе XXI Геологии СССР, выделены: Приволжская прибрежная зона соляных антиклиналей (валов) и Узени-Илекская зона линейно-ориентированных соляных куполов (см. рис. 1).

Соляная тектоника периферических частей Прикаспийской впадины

Южно-Эмбенская прибрежная зона (I) слабо развитых солянокупольных структур¹ протягивается неширокой полосой (50 км) от слияния рек Эмбы и Темира на востоке до Каспийского моря на западе (см. рис. 1). Внешняя граница зоны, примерно, совпадает с юго-восточной границей распространения галогенных отложений кунгура. На юге она проходит вдоль северного склона Южно-Эмбенского погребенного поднятия, а на юго-востоке — по региональному тектоническому нарушению, отделяющему складчатые сооружения Мугоджар от Прикаспийской впадины.

¹ В литературе эта зона получила различные наименования: Кенкияк-Жаракамская зона переходных структур (Эвентов, 1964); Мортукская зона переходных структур (Соловьев, 1966а); Юго-Восточная прибрежная зона (Журавлев, Волчегурский, 1965).

Внутренняя граница зоны может быть проведена лишь условно, так как изменение характера развитых в ней солянокупольных структур к центру впадины происходит постепенно. На крайнем востоке указанной зоны наблюдаются поднятия: Алибекмала, Женажол, Синельниковское, Чудовское, Куантай, Северный Ащицоль и другие, расположенные на одной линии северо-восточного простирания. Подсолевые отложения палеозоя залегают здесь на глубине 2—2,5 км. У этих соляных структур нет типичных соляных ядер. Соляные внедрения не прорывают надсолевые слои, а лишь их приподнимают; они обычно имеют небольшую мощность — от первых сотен до тысячи метров, и представляют собой пологие соляные поднятия. Слои надсолевых толщ над ними полого изогнуты и повторяют очертания кровли соляного тела. Подобные соляные структуры названы Ф. Трусхеймом (Trusheim, 1957, 1960) «соляными подушками».

В надсолевых отложениях структуры характеризуются значительными размерами (длина 10—20 км, ширина 3—10 км). Мощность пермско-триасовой части разреза надсолевых толщ над вершинами «соляных подушек» заметно сокращена. В посттриасовое время развитие этих структур прекратилось. На геологической карте они не выражены, с поверхности здесь выходят отложения верхнего мела и палеогена. Кровля соли в своде этих поднятий залегает обычно на больших глубинах — свыше 1,5—1,8 км. По морфологии такие соляные структуры являются как бы переходными между платформенными брахиантеклиналями и типичными соляными куполами. По данным сейсморазведки, такого рода структуры протягиваются и вдоль южного борта Прикаспийской впадины.

В. С. Журавлев (1963, 1966, 1971) предлагает называть рассматриваемые соляные структурыrudиментарными соляными куполами, но допускает ошибку, относя к ним соляные структуры разного генезиса. Так, отнесенные им к этому типу купола Кенкияк и другие на юго-восточной периферии впадины, на соляных ядрах которых в результате прорыва ими верхнепермских отложений непосредственно залегают слои нижнего триаса, не отвечают соляным структурам типа «соляных подушек». Неправильным является также отнесение В. С. Журавлевым к рассматриваемому типу глубоко погруженных куполов межкупольных депрессий. Рудиментарные соляные купола межкупольных депрессий В. С. Журавлева, формирующиеся над остаточными линзами соли, только по форме близки к «соляным подушкам», но имеют другой генезис.

Северо-западнее соляных структур Алибекмала — Куантай расположаются поднятия, в формировании которых соляная тектоника играла большую роль. Подсолевые отложения залегают здесь на глубине 3—3,5 км, постепенно погружаясь к внутренним частям впадины до глубины 4,5—5 км. Соляные структуры в этой части зоны приурочены к четырем тектоническим линиям, протягивающимся параллельно юго-восточной границе впадины.

В первую (восточную) линию объединяются купола: Шенгельший, Саркрамабас, Кумызтюбе, Новое и Замяттина. При этом купола Саркрамабас, Кумызтюбе и Замяттина являются миниатюрными открытыми. В их сводах обнажены вершины соляных шипов, поднимающихся над глубоко залегающими соляными массивами этих куполов (Журавлев, Самодуров, 1960).

Следующая цепочка состоит из куполов: Арансай, Мортук, Башенколь, Сарксымола, Кожасай, Елубайши. Глубина залегания соляных ядер в этой полосе колеблется от 150 м на севере до 900 м на юге. Размеры их 5×10 км. Высота соляных ядер куполов не превышает 2,5 км.

В третью линию входят купола: Узункараганда, Коздысай, Илейменсаймрак, Тасши и Акжар. Глубина залегания соляных ядер здесь от 400 до 900 м. Интенсивность внедрения их возрастает в северо-западном направлении, более опущенными крыльями являются северо-западные.

Четвертая линия образована куполами: Крыккудук, Итассай, Кызылжар, Аксай, Шурыколь и Байганин. Глубина залегания соляных ядер в них от 300 до 400 м. Своды куполов сильно раздроблены в связи

с более интенсивным проявлением соляной тектоники. Далее к северо-западу (к внутренней части впадины) линейности в расположении соляных структур уже не отмечается.

По сейсмическим данным, на сводах куполов Кенкияк, Мортук, Башенколь, Кожасай, Тасши и др. нижний триас залегает на породах кепрока соляных массивов, а на периферии их и в межкупольных депрессиях — на различных горизонтах татарского яруса верхней перми (рис. 4). Подошва отложений нижнего триаса слегка деформирована вершинами соляных массивов куполов. Мезозойские отложения образуют над ними

Рис. 4. Геолого-геофизический профиль через соляной купол Кенкияк (с учетом данных сейсморазведки). По В. Б. Сдобникову (см. Журавлев, 1963)

1 — геологические границы; 2 — отражающие площадки; 3 — предполагаемое залегание пластов; 4 — предполагаемые очертания соляного массива купола; 5 — предполагаемое залегание подсолевого ложа; 6 — скважины

пологие поднятия. Относительно слабая интенсивность соляной тектоники на этих куполах в мезозойских отложениях объясняется тем, что из окружающих их межкупольных депрессий пластичная соль была полностью выжата еще в позднепермское время.

Южно-Эмбенская зона является единственной в Прикаспийской впадине, где сейсморазведкой МНРП и бурением установлено развитие обращенных межкупольных поднятий. К ним относятся поднятия: Кумсайское, Луговское, Кокжиде, Овражное, Муюнкумское, Аши, Коксайское, Ащисай и др. Эти поднятия пассивные, бескорневые, они лишены пластичных толщ и затухают вниз по разрезу (Бейсенов, 1964; Журавлев, 1966; Авров и др., 1969).

Заложение и развитие обращенных поднятий определялось формированием вторичных компенсационных мульд (или сопряженных мульд), прислоненных к соляным массивам куполов, которые обрамляют межкупольные депрессии. Обращенные межкупольные поднятия выражены по отложениям верхней перми, склонами их служат внешние крылья сопряженных компенсационных мульд. Обращенные межкупольные поднятия тождественны тем структурам Польско-Германской впадины, которые, Ф. Трушейм (Trusheim, 1957, 1960) назвал структурами типа «щит черепахи».

Юго-восточная часть зоны пересечена сейсмическим профилем ХХI, при проведении которого применялись методы КМПВ и МОВ (1961—1963 гг.). В 1964 г. контора «Спецгеофизика» повторно провела по этому профилю сейсмические исследования методом МНРП. Профиль прошел с юго-востока на северо-запад по линии куполов Шенгельши — Мортук — Кенкияк — Коздысай — Октябрьский — Караказган — Карапулельды. Северо-западная его часть находится в области интенсивного развития соляной тектоники Эмбенской зоны, а восточ-

ная — в прибрежной Южно-Эмбенской зоне, включая шовное сочленение впадины с палеозойским складчатым сооружением Урала.

При сравнении результатов разных методов сейсмических исследований выяснилось, что эффективность методов МОВ и КМПВ относительно ограничена (Знаменский и др., 1966). Глубина освещения строения глубоких межкупольных депрессий сейсморазведочными работами МОВ, как правило, не превышает 3—4 км. С достаточной полнотой изучается только верхняя часть надсолевых отложений, представленная морскими образованиями, а мощная толща красноцветов пермо-триаса остается почти не изученной. Конфигурация соляного массива, особенно на участках крутого погружения, надежно не определялась, а отражения от подсолевых горизонтов удалось проследить только спорадически, что не дает надежных данных о строении подсолевого комплекса.

Методом КМПВ поверхность подсолевого ложа прослеживается также только на отдельных участках, а положение поверхности соленосной толщи удается определить лишь в сводах куполов. Глубоко погруженные соляные купола методом КМПВ не выявляются.

В результате повторных исследований по профилю ХХI методом МНРП установлено, что в западном направлении увеличивается (рис. 5) мощность надсолевых отложений в межкупольных депрессиях от 2—2,5 км в районе купола Шенгельши, до 4,5—5 км, в районе куполов Каракульды и Караказган, и мощность соли в соляных массивах (или высота массивов) от 1,5 (Шенгельши) до 4,5 км (Каракульды). В указанном направлении увеличиваются также общая площадь межкупольных депрессий и поперечные размеры соляных массивов куполов. Сокращение мощности надсолевых отложений над сводами куполов происходит преимущественно вследствие уменьшения мощности нижней части надсолевого разреза, сложенной верхнепермско-триасовыми отложениями. По всему профилю в межкупольных депрессиях установлено почти полное выпадение соли из разреза.

По морфологическим признакам соляные купола, расположенные по линии профиля ХХI, можно подразделить на два типа. В юго-восточной части купола Итассай, Коздысай, Кенкияк, Мортук и Шенгельши характеризуются плавными формами и плоскими сводами; размеры их и мощность соли в соляных ядрах небольшие. В северо-западной части профиля (в погруженной части Прикаспийской впадины) купола разнообразны по форме и размерам; для них характерна сложная конфигурация сводов, асимметрия крыльев и большая мощность соли в соляных ядрах. Установлен блоковый характер подсолевого ложа. Купола, как правило, приурочены к зоне разломов в подсолевых отложениях.

Таким образом, для Южно-Эмбенской зоны характерно линейное расположение соляных структур и развитие в прибрежной части зоны соляных поднятий типа «соляных подушек» с глубоким залеганием соли. В направлении к внутренним частям впадины высота внедрения и поперечные размеры соляных ядер увеличиваются. В надсолевых толщах соляные купола имеют небольшие размеры; в прибрежной части зоны они почти лишены дизъюнктивных нарушений. Мезозойско-кайнозойские слои в пределах куполов залегают полого, а в верхнепермских слоях углы падения достигают 30—45°. Степень прорыва соляными ядрами пород верхней перми возрастает к центру впадины. В этом же направлении увеличивается протяженность межкупольных депрессий.

В прибрежной части зоны в межкупольных депрессиях по верхнепермским отложениям наблюдаются обращенные поднятия (поднятия типа «щит черепахи»). Поле силы тяжести слабо дифференцировано. Причина этого заключается в малой мощности гидрохимических отложений кунгура, слагающих ядра куполов. К внутренним частям Южно-Эмбенской зоны дифференцированность поля силы тяжести возрастает.

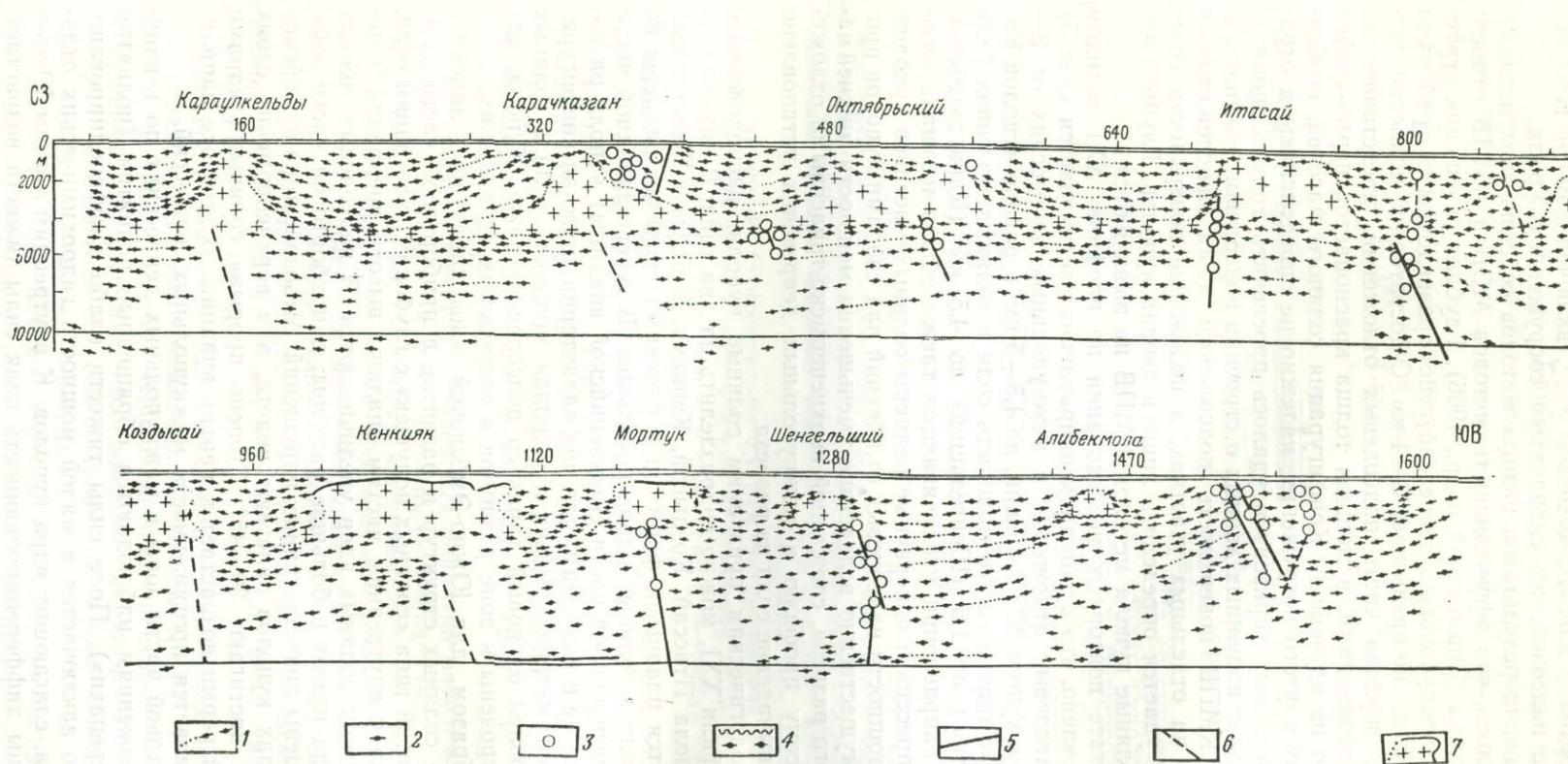


Рис. 5. Сейсмический разрез МРП по профилю ХХI. Составили В. В. Знаменский и др., 1966

1 — протяженные отражающие горизонты; 2 — элементарные площадки; 3 — узлы дефракции; 4 — участки выклинивания отражающих горизонтов; 5 — линии нарушений; 6 — линии предполагаемых нарушений; 7 — кровля соли, построенная по данным бурения

Сарпинско-Енотаевская зона (II) охватывает территорию, простирающуюся от дельты Волги до восточных обрывов Ергеней на западе (см. рис. 1).

Последние данные сейморазведки указывают на наличие здесь крупных соляных массивов, имеющих в плане извилистые очертания, которым соответствуют купола-гиганты Харбино-Полынныи, Сарпинский и Солено-Займищенский. Эти купола сопровождаются компенсационными мульдами (вдавленными и сопряженными). Имеются и более мелкие купола. Соляные массивы куполов не выведены на доверхнеплиоценовую поверхность. Наличие указанных структур показывает, что соляная тектоника здесь проявилась интенсивно, хотя и не была столь активной, как в Центральной зоне. У внешнего юго-западного края зоны область сплошного распространения соленосных отложений и интенсивной соляной тектоники сменяется областью локального распространения этих отложений и слабого проявления соляной тектоники.

Территория, простирающаяся на восток от Волги до дельты Урала, погребена под толщей песков Северного Прикаспия и остается до сих пор почти не исследованной. Можно только наметить положение ее южной границы, осложненной соляной тектоникой, по-видимому, совпадающей с северными контурами Астраханского и Северо-Каспийского подгруженных краевых поднятий. Так, непосредственно за крутым северным склоном Северо-Каспийского поднятия сейморазведкой фиксируются первые слабо выраженные и глубоко погруженные соляные поднятия типа «соляных подушек», которые к северу сменяются нормально развитыми куполами (купола Морской Первый и Морской Второй).

Приволжская прибрежная зона (III) соляных антиклиналей (валов) протягивается неширокой полосой вдоль Волгоградского уступа, ограничивающего с северо-запада Прикаспийскую впадину (см. рис. 1). На севере, в верховьях левого притока Волги (р. Еруслан) она переходит в Узени-Илекскую зону, вытянутую вдоль Жадовского уступа. Вначале Я. С. Эвентов (1956, 1958) называл эту зону переходной. Для Приволжской зоны характерны линейно вытянутые вдоль Волгоградского уступа 3—4 ряда соляных антиклиналей, осложненных соляными куполами и разделенных прогибами. На глубине соляные массивы куполов соединены соляными перешейками.

Данными сейморазведки установлено, что к востоку от Волгоградского уступа подсолевые отложения погружаются на глубину до 5 км и более. Мощность надсолевых отложений в межкупольных депрессиях достигает 4 км, а с приближением к соляным массивам куполов она сокращается до 1 км. Близ соляных массивов углы наклона надсолевых отложений достигают 20° . Соляные купола имеют овальные очертания и размеры: 9—15 км в длину, 6—10 км в ширину. Высота их соляных массивов 3—3,5 км (Никонова, 1960).

Скважины, заданные в сводах Тингутинского, Красноармейского, Ушаковского и других куполов, на глубине 800—1000 м вошли в соляные массивы, на которых здесь залегают отложения нижнего триаса. Данные сейморазведки дают основания предполагать, что соляные антиклинали зоны приурочены к разрывным нарушениям в подсолевом ложе. В восточной части зоны четко выраженная линейность в расположении соляных куполов исчезает, но северо-северо-восточная их ориентировка еще сохраняется.

Узени-Илекская зона (IV) линейно ориентированных скрытопрорванных соляных куполов продолжает на восток Приволжскую зону и протягивается вдоль Жадовского уступа (см. рис. 1). В ней выделяются две подзоны: западная — Узенская и восточная — Утвинская, охватывающая северную окраину Подуральского плато (Журавлев, Шлезингер, 1962). Н. В. Неволин (1965) выделяет Утвинскую подзону в ка-

честве самостоятельной Утвина-Илекской зоны, а Узеньскую объединяет с Приволжской зоной и называет их Северо-Западной прибортовой зоной соляных антиклиналей. И. И. Кожевников и Б. А. Соловьев Узени-Илекскую зону объединяют с Приволжской и именуют их Приволжско-Илекской зоной.

В Узеньской подзоне локальные соляные структуры и отвечающие им локальные аномалии силы тяжести ориентированы широтно вдоль Жадовского уступа. Так, в районе ст. Озинки с севера на юг выделяются три полосы широтно вытянутых поднятий (куполов) с выходами в сводах отложений мела, реже юры и с несложной системой дизьюнктивных нарушений. Соляные купола в пределах этих полос приурочены к единым основаниям — соляным валам (грядам). Полосы поднятий разделены неширокими (до 6—8 км) линейными прогибами, выполнеными отложениями палеогена (Кожевников, 1958).

Линейная ориентированность соляных куполов этой части зоны вдоль бортового уступа Прикаспийской впадины связана с разломами и флексурами, сопровождающими ступенчатое погружение фундамента.

В Утвинской подзоне в отложениях мела и палеогена первоначально выделялись пологие антиклинальные складки (Безруков, 1936). В результате детальных работ в настоящее время установлено, что это не складки, а линейно ориентированные цепочки соляных куполов. Простиранние полос, к которым приурочены цепочки куполов и линейные локальные аномалии силы тяжести, юго-восточное. Полосы линейных цепочек соляных куполов образуют здесь широкую дугу, обращенную выпуклостью к северо-востоку.

Многие из куполов сопровождаются сопряженными компенсационными мульдами, выполненными отложениями палеогена, тогда как в межкуполных депрессиях распространены породы сенона. На западе Утвинской подзоны, на сводах ряда куполов (Замареновском, Январцевском, Буденовском, Туксае) наблюдаются мульды оседания. Время заложения этих мульд различное (миоцен — поздний плиоцен). Крайней северо-восточной структурой Утвинской подзоны Узени-Илекской зоны является Илекская флексура.

Юго-западная граница распространения ориентированных локальных минимумов и максимумов силы тяжести в рассматриваемой зоне в общих чертах совпадает с юго-западной границей распространения линейных цепочек соляных куполов.

Вдоль северной границы Узени-Илекской зоны располагается серия куполов «бортового вала». Соляные породы здесь как бы надвинуты на нарушения бортового уступа в результате экранирования этими нарушениями течения соли (по восстанию пластов) из прилегающих погруженных частей Прикаспийской впадины (Бутковский, Омельченко, 1968). Глубина залегания кровли соли в ядрах куполов бортового вала 800—1500 м. Характерно, что в месте отклонения простирания бортового уступа к северу наблюдается сгруженность соляных структур. Купола следующих к югу цепочек более дислоцированы и нарушены сбросами. В их сводах на доверхнеплиоценовую поверхность выходят породы триаса, юры и нижнего мела. Иногда соль в сводах куполов выходит на доверхнеплиоценовую (купола Чувашинский, Туксайский и др.) и даже современную (Январцевский купол) поверхность.

Мощность соли в ядрах куполов на бортовом валу до 1,2 км, а в южных полосах зоны достигает 4,5—5 км. К югу подсолевое ложе в зоне опускается до глубины 4—5 км и имеет ступенчатый рельеф, отражающий разломы фундамента. На сейсмических профилях, пересекающих Узени-Илекскую зону, под куполами ориентированных цепочек в подсолевых отражающих горизонтах группы Π_1 отмечаются зоны потери корреляции, интерпретируемые как зоны дробления.

Наличие разрывов в подсолевом ложе определило здесь характер деформации соленосной толщи, т. е. образование линейно ориентированных цепочек соляных куполов. В Узеньской подзоне эти разломы (или флексуры) подсолевого ложа ориентированы параллельно Жадовскому уступу, а в Утвинской подзоне расположены косо по отношению к нему. Крайним северо-восточным из них является разлом, над которым образовалась Илекская флексура. Возникновение в Утвинской подзоне разломов юго-восточного (перикаспийского) простирания, по А. А. Богданову (1947), было связано с общим прогибанием центральной части Прикаспийской впадины.

Приволжская и Узени-Илекская зоны представляют собой пример почти прямой зависимости формирования и расположения соляных структур от строения подсолевого ложа. Основными характерными признаками этих зон являются: линейное расположение соляных структур, обусловленное приуроченностью их к разломным нарушениям или флексурами перегибам подсолевого ложа, и усиление амплитуды и раздробленности соляных куполов по мере удаления их от бортового уступа.

Соляная тектоника внутренней части Прикаспийской впадины

Центральная, или Эльтон-Индеро-Челкарская, зона (V) преимущественно прорванных солянокупольных структур охватывает почти всю территорию междуречья Урала и Волги и значительную площадь левобережья р. Урала (см. рис. 1). В этой зоне повсеместно и интенсивно развита соляная тектоника; для нее характерно мозаичное распределение локальных аномалий силы тяжести. Локальные минимумы силы тяжести отвечают соляным куполам, а максимумы — межкупольным депрессиям. В гравитационном поле зоны, вдоль р. Урала, выделяются больших размеров отрицательные аномалии силы тяжести, отвечающие куполам-гигантам Челкару, Санкебаю — Круглому и Индеру (рис. 6). Центральная зона характеризуется наибольшими глубинами залегания подсолевого ложа — до 10—11 км. Здесь отмечаются максимальные значения первоначальной мощности солевого комплекса (3—4 км) и надсолевых верхнепермско-триасовых и юрско-палеогеновых отложений (7—9 км) в межкупольных депрессиях, а также верхнеплиоцен-четвертичных отложений (500—700 м).

Подавляющее большинство куполов Центральной зоны прорванные (открытые). Соль в ядрах куполов либо прорывает надсолевые до верхнеплиоценовые отложения и выходит на поверхность размыва под трансгрессивно залегающими отложениями верхнего плиоцена, либо, главным образом в западной части зоны, обнажается на дневной поверхности. Отмечаются скрыто прорванные (закрытые) купола, соляные ядра которых перекрыты породами триаса, средней юры и нижнего мела. Размеры куполов колеблются от единиц и первых десятков до нескольких сотен квадратных километров. Наименьший из куполов-гигантов — Индер имеет площадь 800 км², у Челкара и Санкебая — Круглого она превышает 2500 км².

Соляные структуры на доверхнеплиоценовой поверхности по размерам и форме подразделяются на четыре типа: 1) купола-гиганты, или мегакупола; 2) соляные валы длиной до нескольких десятков, а в отдельных случаях до сотен километров; 3) укороченные соляные валы; 4) соляные штоки (купола)¹. Соляные валы образуются при соединении соляных куполов соляными перемычками, если последние достигают

¹ Этот тип соляных структур следует называть соляной купол, так как под соляным штоком правильнее понимать соляной массив цилиндрической формы (Косыгин, 1960).

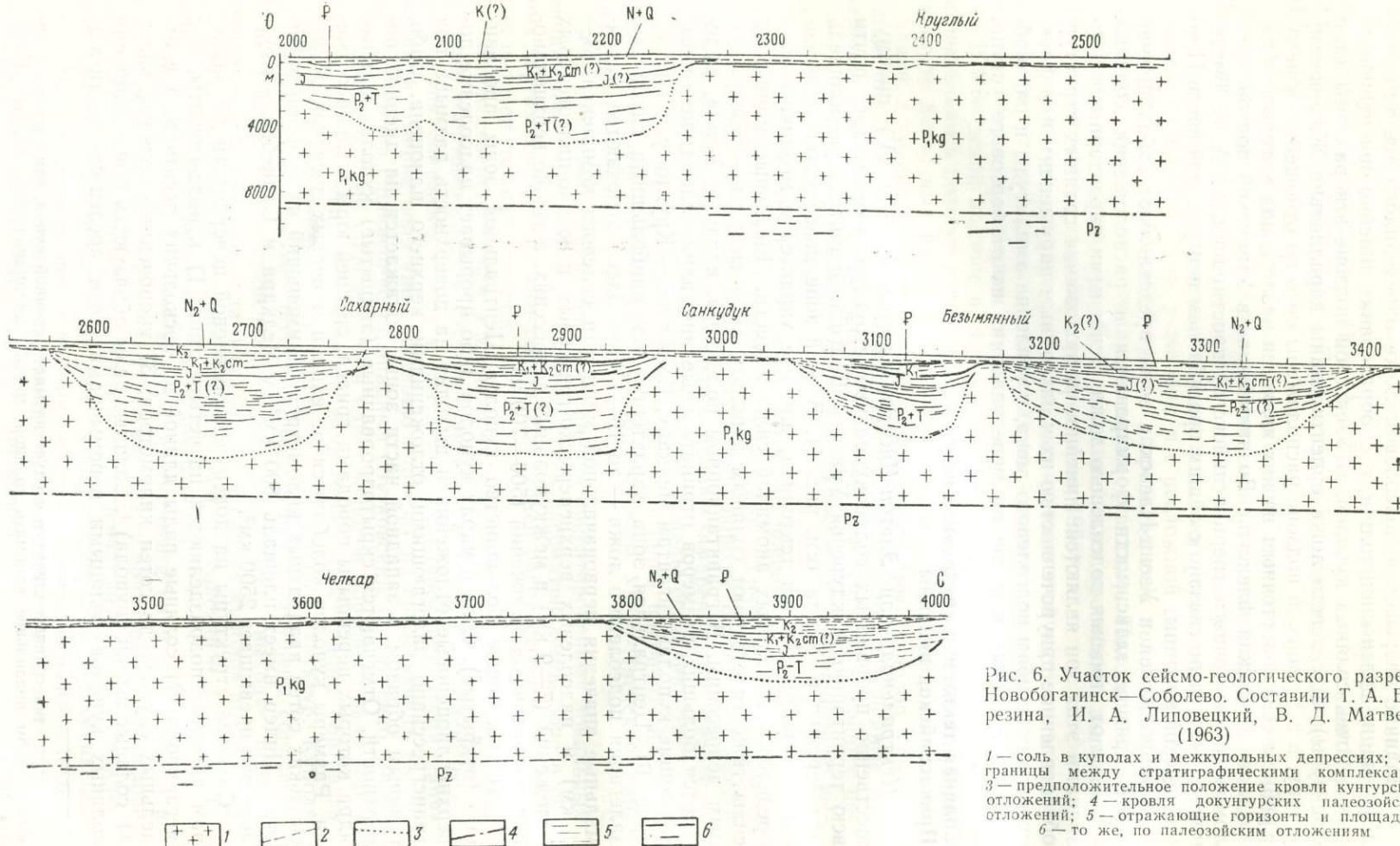


Рис. 6. Участок сейсмо-геологического разреза Новобогатинск—Соболево. Составили Т. А. Березина, И. А. Липовецкий, В. Д. Матвеев (1963)

1 — соль в куполах и межкупольных депрессиях;
2 — границы между стратиграфическими комплексами;
3 — предположительное положение кровли кунгурских отложений;
4 — кровля докунгурских палеозойских отложений;
5 — отражающие горизонты и площадки;
6 — то же, по палеозойским отложениям.

поверхности предверхнеплиоценового размыва (Кожевников, 1964; Соловьев, 1966а, б; Соловьев, Голов, Кожевников, 1967).

В сходных с Прикаспийской впадиной зарубежных солянокупольных областях имеются аналоги соляных валов и штоков (Неволин, 1965): в Польско-Германской впадине это соответственно соляные стены и диапиры Ф. Трусхайма (Trusheim, 1957, 1960), в Примексиканской впадине — соляные хребты и штоки Муррея (Murray, 1961). Образование соляных стен и хребтов, видимо, связано с разрывными нарушениями в подсолевом ложе, т. е. с условиями, близкими к образованию соляных валов (гряд) в Приволжской и Узени-Илекской прибрежных зонах Прикаспийской впадины.

Купола-гиганты имеют звездчатую форму и расположены в полосе меридионального течения р. Урала. На севере полосы находится купол Челкар, на юге — Индер, а между ними — сложный купол Санкебай — Круглый. Полоса развития куполов-гигантов характеризуется максимальными первоначальными мощностями соли. По данным сейсморазведки, в ней уменьшено число отражающих границ, расположенных глубже горизонта Π_1 , что, по мнению Б. А. Соловьева (1966б), объясняется расширением стратиграфического объема соленосной толщи. Это предположение подтверждается находками в соляном массиве Челкар пыльцы артинского возраста.

Форма куполов-гигантов сложная, они имеют многочисленные структурные выступы. Глубина залегания соляных ядер этих поднятий различна. Соляное ядро Индера на площади 250 км² и соляное ядро Челкара в нескольких местах (общей площадью около 6 км²) выведены на современную поверхность. Соляное ядро купола Санкебай — Круглый выходит лишь на доверхнеплиоценовую поверхность на глубине порядка 400 м. Оно имеет три центра формирования — соляные массивы Сахарный, Лебяжинский и Круглый. В структурных выступах, направленных в боковые стороны от ядра, глубина до соли возрастает: на Челкаре до 500—600 м; на Индере до 250—300 м и на куполе Санкебай — Круглый до 800—900 м. Слоны этих соляных массивов на разных участках имеют различную крутизну: от 15—35° до 65—85°.

В западной части поднятия Челкар и в северной и южной частях Индера в отложениях верхней перми наблюдаются соляные карнизы, или навесы. Своды соляных ядер неровные. Так, соляной массив Челкара, погружающийся с севера на юг с абсолютных отметок от +180 до —380 м и ниже, осложнен серией соляных выступов (шипов) и впадин. На соляном массиве Индер также отмечается несколько выступов.

В надсолевых отложениях куполов-гигантов, в соответствии с описанными морфологическими особенностями строения их ядер, выделяются: сводовые части, крылья и структурные выступы. Свод купола Челкар слагают верхнепермские, триасовые, нижне- и среднеюрские породы. Следуя пологому погружению свода соляного массива, эти породы падают с севера на юг. Неровности поверхности соляного массива (выступы и впадины) в надсолевом комплексе отражаются в виде поднятий и вдавленных компенсационных мульд. Многочисленными радиальными сбросами крылья и структурные выступы купола Челкар разбиты на серию блоков. Соляной свод купола Индер на доверхнеплиоценовой поверхности окаймлен надсолевыми отложениями от верхнепермских до верхнемеловых. Эти отложения радиальными сбросами разбиты на отдельные блоки. Углы падения слоев верхней перми и триаса в присводовых частях поднятия достигают 45°; в более молодых слоях они выполняются. В своде купола Санкебай-Круглый на доверхнеплиоценовую поверхность выходят кунгурские и триасовые отложения, на крыльях они последовательно сменяются отложениями юры и мела.

Соляные валы обычно осложнены отдельными поднятиями (вершинами). Примером могут служить купола Матенкожа-Шугуль-Тогыз-Дюсепек, представляющие собой отдельные вершины на едином соляном валу. Глубина залегания соли в сводах соляных валов 250—400 м, а ширина их до 9 км. Слоны валов обычно асимметричны: на пологих склонах углы падения составляют 25—35°, на крутых они достигают 40—70°.

Наиболее полно изучен сейсмическими исследованиями купол Матенкожа. Получены интересные данные об изменении углов падения склонов его соляного ядра с глубиной. В целом соляное ядро характеризуется асимметричностью склонов: северный склон пологий, углы падения 30—35°, на южном склоне они достигают 40—50°. С глубины 1,5—2 км наблюдается резкое погружение соли с углами до 70°, на глубине 6—7 км склон выполаживается и на 8 км соль залегает горизонтально. В восточной части южного склона в толще верхнепермских отложений отмечен соляной карниз; подворачивание кровли соли происходит на глубине 2,7 км.

На доверхнеплиоценовой поверхности своды соляных валов образованы отложениями не моложе юрских. На крыльях последовательно выходят все более молодые породы. Углы падения этих слоев в присводовых частях крыльев достигают 20—25°, а на погружениях их не превышают 8—10°. Надсолевой комплекс отложений соляных валов дислокирован весьма сложно. Он разбит многочисленными радиальными и продольными сбросами; последние иногда образуют грабены.

Укороченные соляные валы являются промежуточной формой между соляными валами и штоками. К этому типу относятся купола Сантимола, Кожакуль, Аманган, Богырдай, Кзыл-Бархан и др.

Соляные штоки (купола) — небольшие, округлые, чаще овальные поднятия диаметром 5—10 км. Соляные ядра этих структур залегают на глубинах от 80 м (Булекбай) до 1500 м (Бесоба). Сводовые части ядер обычно одновершинные, островерхие, склоны несимметричные, довольно крутые; иногда осложнены соляными карнизами (Булекбай). Надсолевой комплекс нарушен радиальными сбросами.

Среди отрицательных структур зоны широко развиты вдавленные компенсационные мульды. Они осложняют своды соляных массивов куполов-гигантов Санкебай-Круглый, Челкар, Индер и др. По амплитуде прогибания уникальной среди них является Жалтырская мульда. Формировались вдавленные мульды, по-видимому, в различное время после триаса в связи с обособлением и подъемом выступов соляного массива. В этих мульдах нередко непосредственно на соли залегают отложения апта, альба, сеномана и даже сенона. Ряд куполов сопровождается сопряженными компенсационными мульдами. Наиболее прогнутой из них является Абжельская.

Морфологические типы соляных структур зоны и их размещение четко фиксируются на палеогеологической карте со снятым покровом верхнеплиоценовых и четвертичных отложений, составленной И. И. Ко-жевниковым, Б. А. Соловьевым в 1966 г. и на схеме тектонического строения Прикаспийской впадины. На этих картах видно, что соляные структуры зоны образуют дугообразные и кольцевые цепочки, опоясывающие межкупольные депрессии. В узлах пересечения колец (или дуг) расположены купола звездчатой формы. Структурные выступы этих куполов указывают на направление развития колец от места их пересечения. Основную часть колец или дуг составляют соляные валы или укороченные соляные валы, расположенные на продолжении структурных выступов куполов звездчатой формы. На палеогеологической карте своды и крылья соляных валов, входящих в состав колец, фиксируются дугообразными полосами выходов отложений триаса, юры,

нижнего и верхнего мела. В пределах этих полос наблюдаются овальной и округлой формы цепочки выходов отложений кунгура, которые слагают ядра куполов, осложняющих валы.

Купола валов и крупные звездчатые купола часто являются соляными структурами прорванного типа. Внутри дугообразных полос размещены межкупольные депрессии неправильной формы. Они выполнены на поверхности доверхнеплиоценового среза восточной части зоны породами сенона (преимущественно маастрихта), и лишь в наиболее прогнутых участках (в сопряженных компенсационных мульдах) в виде изолированных пятен сохранились отложения палеогена. Межкупольные депрессии западной части зоны выполнены палеогеновыми отложениями. В них отмечается наибольшая мощность надсолевого разреза.

В других случаях дугообразная полоса выходов более древних пород разорвана и на ее продолжении наблюдается цепочка овалов соляных куполов. На палеогеологической карте соляные купола фиксируются в виде овалов, состоящих из концентрических полос выходов отложений кунгура, триаса, юры и мела или только триаса, юры и мела. В последнем случае они характеризуют купола скрыто-прорванного (закрытого) типа. Часто эти полосы расчленены системой радиальных сбросов на ряд сегментов. Иногда большая часть кольца состоит из отдельных изолированных овалов соляных куполов, которые на глубине, видимо, соединяются перемычками. На участках развития куполов-гигантов размер площадей куполов пре-восходит размер межкупольных депрессий.

Приведем несколько примеров кольцевого размещения соляных куполов на поверхности предверхнеплиоценового среза (рис. 7).

Купола Сахарный с юго-восточным выступом, Лебяжинский и Круглый с северо-восточным структурным выступом участвуют в строении одного кольца, несколько разомкнутого на северо-востоке. К этому кольцу примыкает второе, в строении которого участвуют купола Круглый, Лебяжинский, Сахарный и его западный структурный выступ и находящиеся на продолжении последнего купола Шакей, Санкбай и Итмуран. При этом купола Лебяжинский, Круглый и Сахарный участвуют в строении обоих колец. Выходы надсолевых толщ, слагающих

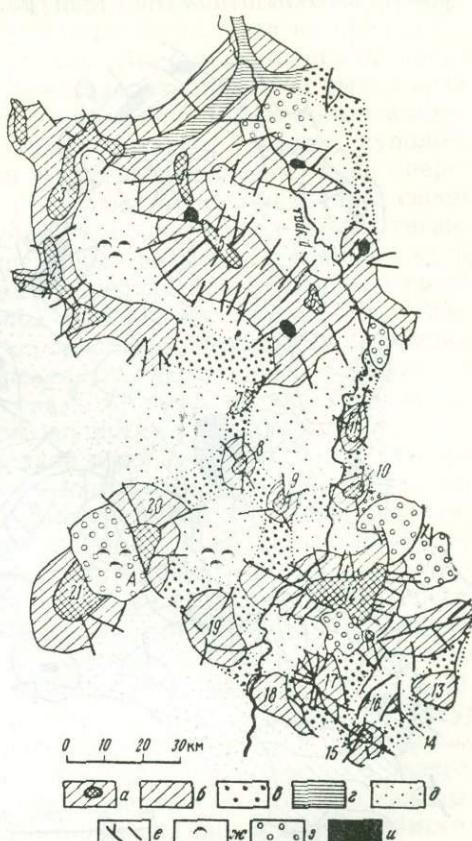


Рис. 7. Тектоническая схема части Центральной зоны (по поверхности предверхнеплиоценового среза)

a — прорванные соляные купола; *b* — скрыто-прорванные соляные купола; *c* — соляные перемычки; *d* — грабены соляных куполов; *e* — разрывные нарушения; *ж* — купола второй генерации; *з* — вторичные компенсационные мульды; *и* — надводные мульды оседания

Купола кольцевых соляных массивов: (первая генерация): 1 — Итмуран, 2 — Санкбай, 3 — Шакей, 4 — Сахарный, 5 — Лебяжинский, 6 — Круглый, 7 — Парфеново, 8 — Харкин II, 9 — Харкин I, 10 — Шоктыбай, 11 — Калмыково, 12 — Идер, 13 — Джандальсар, 14 — Жаймурла; 15 — Кудук, 16 — Байнак, 17 — Джаманиндер, 18 — Жарсугат, 19 — Багырдай, 20 — Барханий; 21 — Бектеньбоба. Купола внутри кольцевых массивов (вторая генерация): А — Тукбай и др.

своды и крылья этих куполов, образуют на карте почти сплошные кольцевые полосы. В пределах полос наблюдаются изолированные овальной формы выходы отложений кунгура, слагающие ядра куполов.

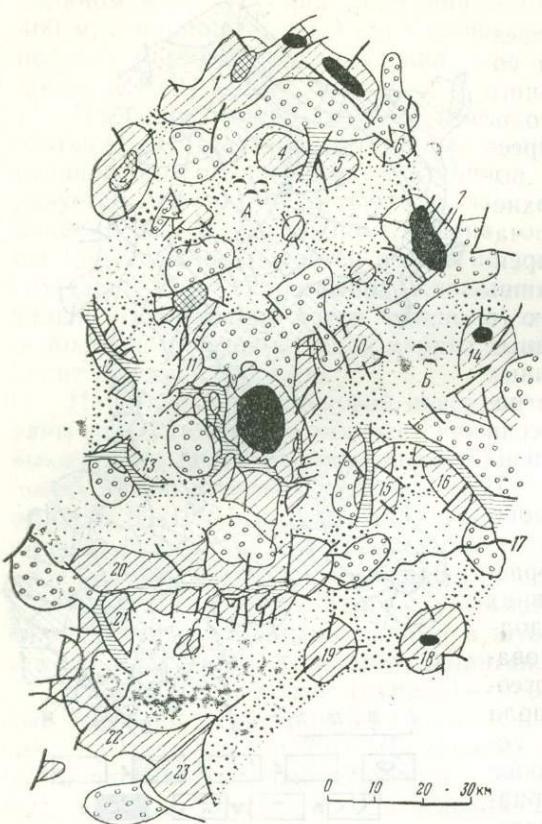


Рис. 8. Тектоническая схема смежных участков Хобдинской и Центральной зон (по поверхности предверхнеплиоценового среза)

Условные обозначения см. рис. 7.

Купола кольцевых соляных массивов (первая генерация):
1 — Саралыба, 2 — Карабелес, 3 — Кособа Западная,
4 — Кокте, 5 — Акмечеть, 6 — Бесоба, 7 — Кульсай, 8 —
Кособа Восточная, 9 — Бекет, 10 — Суале Восточный,
11 — Тюбекудук, 12 — Аманган, 13 — Кожакуль, 14 —
Саурбай, 15 — Мукан, 16 — Миляны, 17 — Кенел, 18 —
Шаганколь, 19 — Бальгут, 20 — Матенкожа, 21 — Шугуль,
22 — Тогыз, 23 — Дюсепек. Купола внутри кольцевых массивов (вторая генерация): А — Аппак, Б — Умбетзор

В северо-западной части зоны обширный купол субширотного простирания Саралыба и расположенная к югу от него дуга с небольшими по размерам соляными куполами Карабелес, Кособа Западная, Кокте, Акмечеть и Бесоба намечают еще одно кольцо. Свод купола Саралыба на поверхности сложен породами кунгура и средней юры, а в сводах более мелких куполов выходят нижнемеловые и среднеюрские отложения.

Наконец, крупный купол Тюбекудук и примыкающие к нему соляные купола: с запада Кожакуль и Аманга, с севера Кособа Западная, Кособа Восточная и Бекет, а с востока Суале Восточный и Мукан намечают еще три кольца (см. рис. 8).

Таким образом, в Центральной зоне строение колец на предверхнеплиоценовой поверхности среза различное. В их строении участвуют все

Южная часть купола Круглый вместе со структурным выступом и примыкающими к нему с юга куполами — Парфеново, Харкин II, Харкин I, Шоктыбай и Калмыково образуют следующее кольцо. В сводах соляных куполов этого кольца выходят отложения кунгура, юры и нижнего мела. Купол Индер и его северо-западный и северный структурные выступы, а также купола Харкин I и Шоктыбай участвуют в строении другого кольца (см. рис. 7). К последнему примыкает кольцо, состоящее из западного выступа купола Индер, куполов Харкин I, Харкин II, Барханного и Багырдай. Купол Индер, его западный структурный выступ и купола Багырдай, Жарсаут, Джаманиндер и Байнак образуют новое кольцо. С куполом Индер связаны купола Байнак, Кудук, Жанмурла и Джандалысор, образующие следующее кольцо. Таким образом, купол Индер находится в узле пересечения нескольких колец, а купола Шоктыбай, Харкин I, Багырдай и Байнак входят в состав двух смежных колец.

Восточнее купола Индер, купола Матенкожа — Шутуль — Тогыз — Дюсепек, образующие единый соляной вал, и соляной купол Бальгут намечают самостоятельное кольцо (рис. 8).

морфологические типы соляных структур, располагающихся в виде укороченных или удлиненных дугообразных полос, иногда почти смыкающихся в сплошные кольцевые полосы. Эти полосы соответствуют соляным валам. В разомкнутых дугообразных полосах на их продолжении наблюдаются цепочки овалов куполов. Внутри таких полос часто также наблюдаются цепочки овалов, представляющие собой выход соли кунгура в ядрах куполов. Иногда на продолжении структурных выступов куполов-гигантов располагается только цепочка овалов куполов.

В пределах рассмотренных типов колец выделяются купола, опережающие развитие других, и купола, несколько запаздывающие в своем развитии. Первые, обычно более крупные купола (иногда купола-гиганты), как правило, прорванные. Поперечные размеры соляных ядер к моменту достижения ими поверхности предверхнеплиоценового среза видимо, соизмеримы с первоначальной мощностью соли в зоне. Вторые — остальные купола колец, они прорванные, изредка скрытопрорванные. Размеры соляных ядер определяются степенью всплыивания соли к рассматриваемой поверхности среза. У самых мелких куполов ядрами являются, по-видимому, апофизы крупных соляных массивов.

В Центральной зоне сейсморазведкой выявлены небольшие глубоко погруженные соляные структуры, не имеющие отражения на картах предверхнеплиоценовой поверхности и гравиметрической. Эти поднятия располагаются в межкупольных пространствах и на карте аномалий силы тяжести выражены локальными гравитационными максимумами. Они фиксируются на сейсмопрофилях пологими антиклинальными перегибами глубоко залегающих отражающих горизонтов. К таким соляным структурам И. И. Кожевников, А. А. Голов и Б. А. Соловьев относят структуры Тукбай, Мухор, Молкудук, Истовой и др. (см. рис. 7 и 8).

Основными отличительными особенностями соляных структур Центральной зоны являются: 1) широкое развитие куполов прорванного типа, соляные ядра которых выходят на доверхнеплиоценовую поверхность размыва, а иногда и на дневную поверхность. Высота соляных ядер куполов достигает 7—8 км, некоторые из них в верхнепермских отложениях и на поверхности предверхнеплиоценового среза имеют навесы, указывающие на этапы наиболее интенсивного перемещения соли; 2) четкое расположение соляных структур в виде дугообразных и кольцевых цепочек вокруг межкупольных депрессий на предверхнеплиоценовой поверхности среза; 3) разнообразие формы и размеров соляных структур, входящих в пределы колец; 4) наличие вдавленных компенсационных мульд в сводах куполов; 5) наличие куполов с большими поперечными размерами, обусловленными большой первичной мощностью соли, в полосе развития куполов-гигантов превышающими размеры разделяющих их межкупольных депрессий; 6) развитие в межкупольных депрессиях мелких соляных куполов скрытопрорванного типа, которые фиксируются только сейсморазведкой.

Хобдинская зона соляных структур (VI) располагается на стыке Узени-Илекской, Эмбенской и Центральной зон (см. рис. 1). Местоположение ее примерно совпадает с одноименным региональным гравитационным максимумом. Для этой зоны характерны положительные значения изоаномал, которые оконтуривают здесь не только относительные максимумы, но и минимумы. Гравитационное поле зоны четко дифференцировано: относительные минимумы невелики по размерам, зоны максимумов более обширны. Хобдинская зона характеризуется глубинами залегания подсолевого ложа (7—8 км) меньшими, чем в Центральной зоне. В связи с этим и мощность соли и надсолевых толщ в ее пределах несколько меньше, чем в Центральной зоне.

По форме соляных структур в плане, обусловленных строением соляного массива на глубине, Б. А. Соловьев (1966 а, б) на палеогеоло-

гической карте предверхнеплиоценового среза выделяет: соляные валы, укороченные соляные валы, соляные штоки (купола) и мелкие, обычно однокрылые соляные структуры. Он указывает на различие в характере проявления соляной тектоники восточной и западной частей зоны: на востоке соляные структуры имеют меньшие размеры и занимают по сравнению с межкупольными депрессиями меньшую площадь, чем на западе. Соляные валы на западе зоны состоят из куполов: Карасу-Жарчагыл; Алгабас — Телесу — Тюртчагне; Миялы — Кенел, а на востоке Жекендыйсай и Чингис.

В основании соляных валов расположены соляные массивы, которые осложнены соляными вздутиями, залегающими на глубине 350—600 м. Соляной вал Карасу — Жарчагыл имеет два вздутия, соляной вал Алгабас — Телесу — Тюртчагне — три вздутия. Протяженность этих валов 35—40 км. Склоны соляных ядер относительно симметричны, углы падения их 20—30°. Структуры надсолевых отложений представлены брахиантклинальными складками. В своде их выходят триасовые и юрские отложения, а на крыльях — ниже- и верхнемеловые. Крылья разбиты радиальными сбросами на блоки.

Группу укороченных соляных валов составляют структуры: на западе — Карабелес, Кульсай, Саурбай, Мукан и Миялы, а на востоке — Майлисай. Соляные ядра этих структур залегают на глубине 300—400 м и имеют в плане овальную форму. Углы падения склонов соляных ядер по простирианию изменяются от 30 до 70° и с глубиной увеличиваются. На западном склоне купола Саурбай на глубине 500—700 м по сейсмическим данным соль образует карниз. В надсолевых отложениях эти структуры представлены брахиантклинальными складками, расчлененными продольными и поперечными сбросами на ряд блоков. В некоторых случаях наблюдаются грабены. В присводовых частях складок на предверхнеплиоценовую поверхность размыва выведены триасовые или юрские отложения, на крыльях они сменяются ниже- и верхнемеловыми. Углы падения слоев на крыльях 10—20°.

Наиболее многочисленную группу соляных структур на западе зоны составляют небольшие купола округлой формы — Хаместколь, Булдурты, Кособа Западная, Бесоба, Акмечеть, Кокте, Кособа Восточная, Бекет, Сауле Восточный, Шаганколь и Тайсуган. Соляные ядра этих куполов имеют плоские или острые своды и расположены, по данным сейсморазведки, на глубинах от 400 до 1500 м; в плане они округлой формы, диаметр их достигает примерно 7 км. Углы наклона склонов ядер 50—70°. На доверхнеплиоценовую поверхность соляное ядро выходит только у купола Хаместколь (у западной границы зоны). В строении сводов надсолевых отложений участвуют слои юры, неокома и апта, а на крыльях залегают отложения нижнего и верхнего мела. Углы падения слоев на крыльях 10—12°. Надсолевые отложения разбиты радиальными сбросами на ряд блоков.

Последней категорией структур, развитых главным образом в восточной части зоны, являются мелкие неправильной формы, большей частью однокрылые соляные купола Байтас, Самай, Карагату, Курсанкудук, Толпак, Кызылкурган и др., которые изучены только геологической съемкой. Своды этих структур образованы слоями сеномана и альба, что свидетельствует о значительной погруженности соляных ядер. Более древние отложения обнаружены лишь на нескольких куполах.

Соляные структуры Хобдинской зоны, как и Центральной, характеризуются кольцевым расположением. Кольца Центральной зоны Саралыоба — Карабелес — Кособа Западная — Кокте — Акмечеть — Бесоба; Тюбекудук — Кособа Западная — Кособа Восточная — Бекет — Сауле Восточный, Тюбекудук — Сауле Восточный — Мукан (см. рис. 8) ча-

стично продолжаются на территорию западной части Хобдинской зоны. К последнему кольцу с юго-востока примыкает новое кольцо, состоящее из соляных куполов Мукан — Миялы — Кенел — Шаганколь — Бальгут — Матенкожа, которые расположены почти целиком в пределах рассматриваемой зоны. Для восточной части зоны, как пример, могут быть приведены кольца, состоящие из соляных куполов: Ботакоз — Байтас — Бегалы — Тасымай — Майлсай — Искарсай; Жарсай — Искарсай — Угамола — Карагатау — Джундусай; Джундусай — Сауржубантюбе — Орындыкты — Косбатыр — Жекендисай (рис. 9).

В строении колец участвуют в основном небольшие купола округлой и неправильной формы, реже соляные валы. Ядра этих структур значительно погружены (перекрыты отложениями триаса и юры) и на поверхность доверхнеплиоценового размыва выходят редко. В отличие от Центральной зоны, кольца здесь построены более просто и представлены либо укороченной дугообразной полосой выходов более древних пород (соляной вал), на продолжении которой располагаются цепочки овалов (купов), либо состоят только из цепочки овалов. Второй особенностью зоны является преобладание площади межкупольных пространств над площадью, занимаемой соляными куполами.

Кроме описанных структур, четко выраженных на доверхнеплиоценовой поверхности, здесь предполагается наличие ряда глубоко погруженных поднятий, которые фиксируются (только по данным сейсморазведки) антиклинальными изгибами глубоко залегающих горизонтов. Б. А. Соловьев (1966а, б) относит к ним структуры Жоскрайт, Камысколь, Уил, Кудук, Аппак, Умбетсор, Сапакколь, Мынгельды, Кзылсай, Киил, Кандык и др. Эти купола расположены в пределах межкупольных депрессий (первичных компенсационных мульд). Рассмотрим строение некоторых из них по сейсмическим разрезам, составленным Б. А. Соловьевым (1966а) по материалам Казнефтегеофизики (рис. 10).

Структура Жоскрайт расположена между куполами Матенкожа и Кенел (см. рис. 10, б). Соляное ядро ее залегает на глубине не менее 3 км. Углы падения III отражающего горизонта — подошвы неокома на крыльях структуры на западе 2—3°, на востоке 8—15°. По оси структуры нарушена сбросом. На доверхнеплиоценовой поверхности, как предполагает Б. А. Соловьев, свод структуры слагают отложения кампана.

Структура Камысколь (см. рис. 10, а) зафиксирована сейсмопрофилем южнее купола Кенел. На глубине от 1,5 до 5 км здесь наблюдается антиклинальный изгиб отражающих площадок. Углы падения

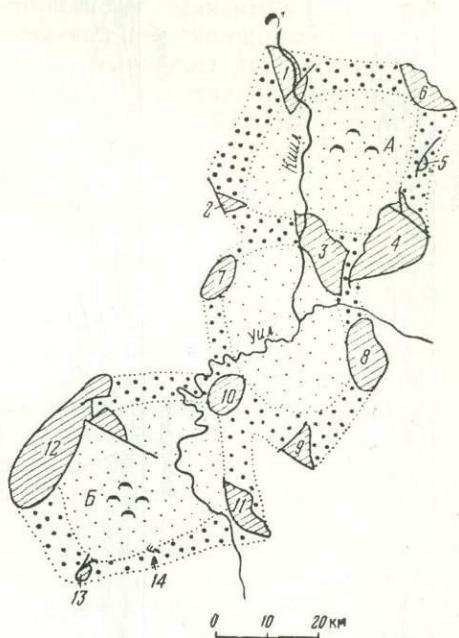


Рис. 9. Тектоническая схема участка Хобдинской зоны (по поверхности предверхнеплиоценового среза)

Условные обозначения см. рис. 7.
Купола кольцевых соляных массивов (первая генерация):
1 — Байтас, 2 — Ботакоз, 3 — Искарсай, 4 — Майлсай, 5 — Тасымай, 6 — Бегалы, 7 — Жарсай, 8 — Угамола, 9 — Карагатау, 10 — Джундусай, 11 — Сауржубантюбе, 12 — Жекендисай, 13 — Косбатыр, 14 — Орындыкты. Купола внутри кольцевых массивов (вторая генерация):
A — Кандык, B — Кзылсай

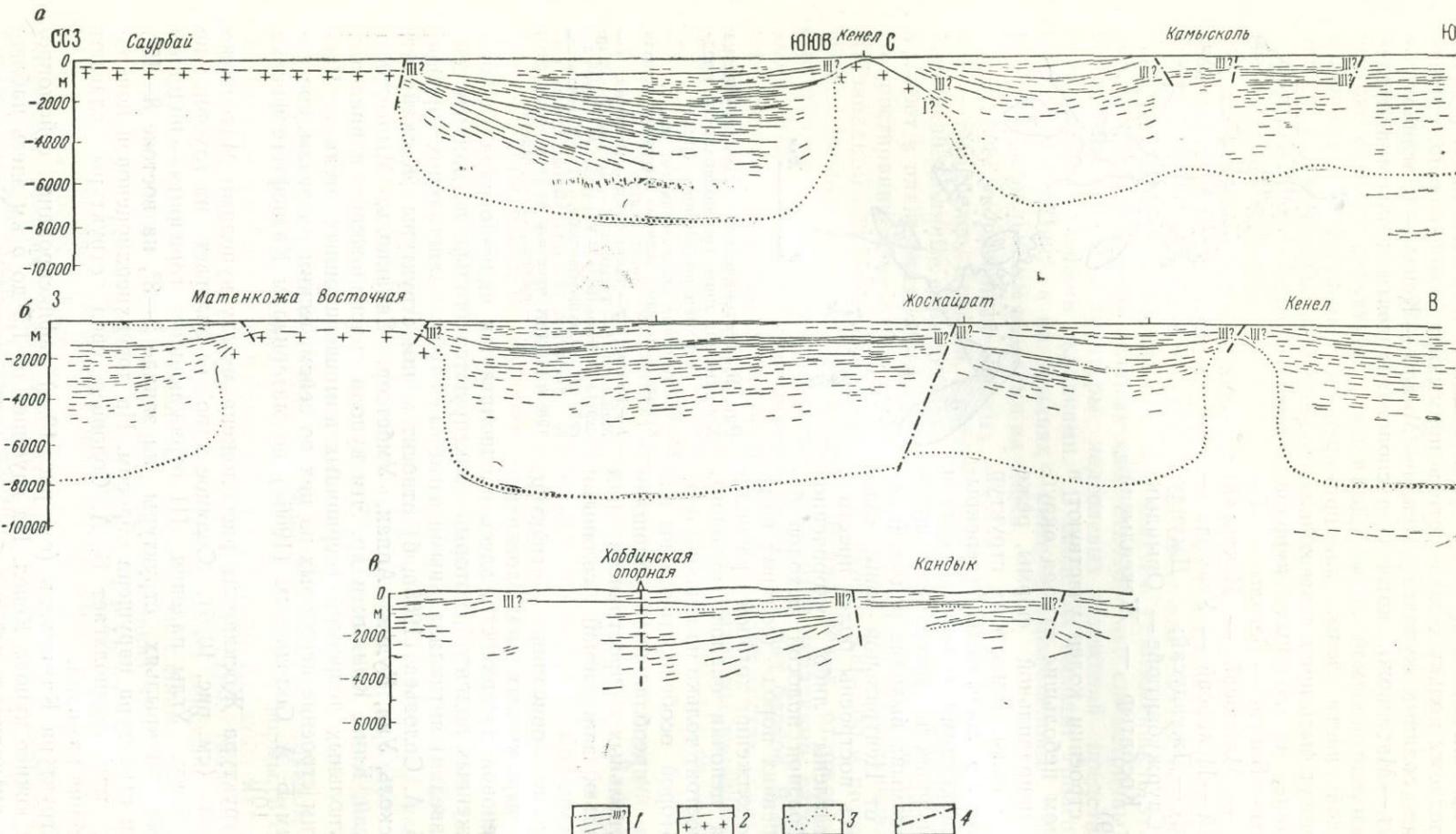


Рис. 10. Соотношение глубоко погруженных межкупольных соляных структур (куполов второй генерации) с куполами первой генерации. Сейсмические профили (а, б, в) составлены Б. А. Соловьевым (1966)
1 — отражающие горизонты; 2 — положение кровли соли в сводах куполов, по данным бурения; 3 — предполагаемое положение кровли соли; 4 — разрывные нарушения

пород на севере 15—17°, на юге 4—6°. В надсолевых отложениях зафиксированы три тектонических нарушения.

На востоке Хобдинской зоны в межкупольном пространстве, окруженно куполами Ботакоз-Байтас-Бегалы-Тасымай-Майлисай-Искарсай, соответствующем локальному гравитационному максимуму Кандык, при выборе места заложения Хобдинской опорной скважины была проведена сейсморазведка. В результате были выявлены две структурные формы (см. рис. 10, в): мульда, отвечающая собственно максимуму Кандык, и глубоко погруженная соляная структура Кандык северо-западного простирания. Глубина залегания III (?) отражающего горизонта (подошва неокома) в своде поднятия Кандык достигает 300 м. Углы падения III (?) горизонта на северо-восточном и юго-западном крыльях равны 4—5°.

Хобдинская зона в целом характеризуется: 1) более глубоким залеганием ядер соляных структур, которые прорывают верхнепермско-триасовые и лишь частично мезозойско-кайнозойские отложения; гидрохимические отложения кунгура на предверхнеплиоценовую поверхность размыва выходят лишь в редких случаях; 2) однообразием размеров и форм соляных структур, представленных однокрылыми (реже многокрылыми) соляными куполами и значительно реже укороченными соляными валами, как правило, скрытопрорванного типа; по сравнению с Центральной зоной, здесь поверхность предверхнеплиоценового среза вскрывает соляные структуры на более высоких срезах, что свидетельствует о некотором ослаблении интенсивности соляной текtonики; 3) расположением соляных поднятий в виде кольцевых цепочек вокруг межкупольных депрессий на поверхности предверхнеплиоценового среза; 4) небольшими поперечными размерами соляных поднятий, занимающих меньшую площадь, чем межкупольные депрессии; 5) наличием глубоко погруженных небольших соляных поднятий в пределах межкупольных депрессий.

Эмбенская зона (VII) протягивается к юго-востоку от Хобдинской зоны с юго-запада на северо-восток в виде широкой полосы скрытопрорванных соляных куполов (см. рис. 1), изученных В. С. Журавлевым (1960); В. С. Журавлевым и А. Е. Шлезингером (1962); Н. В. Неволиным (1961, 1965); Г. Е.-А. Айзенштадтом, К. В. Антоновым (1963).

Купола зоны на северо-востоке подходят к складкам Предуральского краевого прогиба, а южнее соприкасаются со складками Южного периклинального прогиба Урала. Переход от структур краевого прогиба к соляным куполам Эмбенской зоны постепенный. На северо-востоке зоны развиты узкие линейные соляные валы иногда с экранированными мульдами оседания в сводах (Ново-Сергеевская и Шубарсайская мульды). Юго-западнее преобладают сравнительно мало нарушенные сбросами укороченные соляные валы (Конжар, Шийли-Болгарский и др.), также иногда с мульдами оседания в сводах. В этом районе находится один из немногих открытых соляных куполов (Ащебулак).

Далее к юго-западу развиты многочисленные соляные купола. Они характеризуются различной морфологией, размерами и глубиной эрозионного среза, что было обусловлено различиями в глубине залегания, размерах и крутизне склонов соляных массивов. В большинстве случаев склоны массивов крутые, осложнены уступами, иногда, возможно, подвернутыми (купол Макат). Глубина залегания вершин соляных массивов колеблется от 100 до 700 м. Вершины их по форме различны. Они плосковерхие, островерхие, вогнутые, часто осложнены выступами, а иногда бывают и горизонтальными (рис. 11).

Надсолевые структуры куполов зависят от глубин залегания и морфологии соляных массивов. Соляные купола имеют в плане округлую, трехугольную и разветвленную форму, наиболее распространена оваль-

ная. Морфологические типы соляных куполов зоны по количеству крыльев следующие: однокрылые (Куздыкара, Жиланды, Ербулек и др.); двухкрылые (Кокбулак, Кошак-Танатар, Мунайлы и др.); трехкрылые (Доссор, Корсак, Туктубай и др.) и многокрылые (Искине, Тюлюс и др.). Купола, особенно последней группы, часто осложнены радиальными, продольными и оконтуривающими сбросами и продольными грабенами (Неволин, 1965).

В надсолевых отложениях наблюдаются размыты и несогласия. Так, на куполе Искине отложения апта залегают резко трансгрессивно

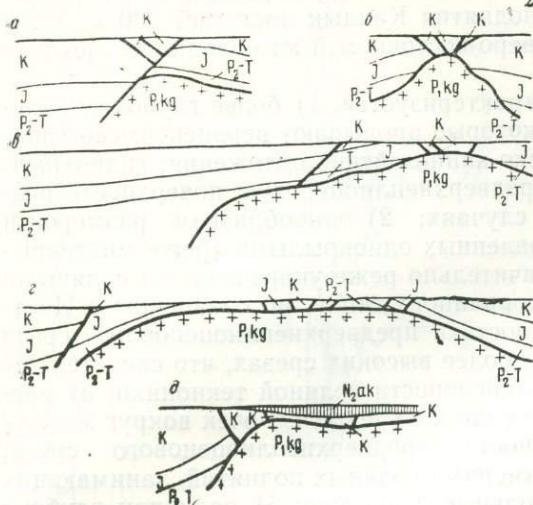


Рис. 11. Типы нормально развитых куполов Прикаспийской впадины с закрытыми соляными массивами (по В. С. Журавлеву, 1966)

α — купола с неразмытыми или неразмывавшимися в постледниковое время соляными массивами (Корсак и др.); β—δ — купола с размытыми в постледниковое время соляными массивами (Мунайлы и др.), γ — с плосковерхими соляными массивами, с кровлей, осложненной соляным гребнем (Кошак-Танатар и др.), δ — то же, с горизонтальной кровлей соляных массивов (Искине и др.), δ — то же, с вогнутой кровлей соляных массивов (Туктубай и др.).

Крупные купола исключительно редки (Тамдыколь 2000 км²).

Соляные куполы зоны скрытопрорванные, их соляные массивы частично или полностью прорывают отложения верхнепермско-триасового структурного этажа. На многих куполах частично прорваны и отложения юрско-палеогенового этажа. В сводах куполов на современную или дочетвертичную поверхность выходят нижнемеловые, юрские и реже триасовые породы.

Купола зоны нередко сопровождаются сопряженными компенсационными мульдами. В юго-западной части зоны, где межкупольные депрессии сложены главным образом слоями маастрихта, мульды выполнены отложениями палеогена. Вдавленные компенсационные мульды на сводах куполов встречаются крайне редко (на куполе Тамдыколь). Наложенные мульды оседания установлены только на куполах Тамдыколь и Кумсай-Чиликты.

На поверхности предверхнеплиоценового среза наблюдается кольцевое расположение куполов вокруг межкупольных депрессий. Примером такого расположения может служить Егиндинская группа куполов: Абдыбулак, Чулакайн, Кузкудуксай, Егинды и Урумбексай. Внутри этого полукольцевого массива наблюдается небольшой купол — Шок-

на. В надсолевых отложениях на породах неокома, юры и триаса, а также на вершине его соляного массива; на куполе Тентяксор отложения неокома срезают породы юры и триаса и т. п. Однако эти несогласия не региональные, а местные и зависят от скорости подъема конкретных куполов, на которых они установлены.

У типичных ядер куполов Эмбенской зоны в строении противоположных склонов, как правило, наблюдается четко выраженное различие: один склон обычно бывает крутым, другой пологим. Первому в надсолевых отложениях соответствует приподнятое крыло, второму опущенное (Неволин, 1965). По размерам соляные купола зоны очень различны: от нескольких квадратных километров (Жарсай, Сорколь и др.) до сотен квадратных километров. Средними размерами купола можно считать 30—50 км².

парсай, который интересен тем, что является одной из немногочисленных межкупольных структур прорванного типа (рис. 12).

В Дангарской, Доссор-Макат-Сагизской, Тюлюс-Кулсаринской, Акмай-Эршансорской и в других межкупольных депрессиях по сейсмическим данным установлены мелкие скрытопрорванные купола, ядра которых частично прорывают верхнепермские отложения. Возраст этих куполов, в частности Дангарского, по выявленному сейсморазведкой резкому угловому несогласию между почти горизонтально залегающими отложениями юры и наклонно (с углами до 25°) лежащими породами триаса и верхней перми устанавливается как доюрский.

Интенсивная соляная тектоника создает исключительно сложное мозаичное строение гравитационного поля Эмбенской зоны. Оно резко дифференцировано со сравнительно небольшими по размерам локальными минимумами и максимумами. Относительные локальные минимумы всегда отрицательны; максимумы почти всегда положительны. Для минимумов, соответствующих соляным поднятиям, характерны сложные взаимосвязи. П. Я. Авров и Л. Т. Космачева (1960) указывают, что оси гравитационных минимумов (соляные валы) кольцеобразно окаймляют максимумы силы тяжести (межкупольные депрессии).

Промежуточное положение Эмбенской зоны между Центральной и Южно-Эмбенской (прибрежной) зонами определяет особенности ее строения. Соляные купола в ней в основном скрытопрорванные, частично или полностью прорывающие отложения верхнепермско-триасового структурного этажа, а иногда частично и юрско-палеогенового. Морфологические типы поднятий в надсолевых толщах на современном или дочетвертичном срезе представлены однокрылыми, двухкрыльными, трехкрыльными и многокрыльными куполами, осложненными системой разрывных нарушений (радиальными и продольными сбросами и грабенами). Размеры соляных куполов в среднем небольшие при большой плотности размещения их на площади. Поперечные размеры куполов несколько меньше поперечных размеров мульд. Соляные купола группируются вокруг межкупольных депрессий в виде кольцевых цепочек. В ряде межкупольных депрессий наблюдаются мелкие скрытопрорванные купола, которые фиксируются главным образом по сейсмическим данным. Надо полагать, что развитие таких куполов в пределах зоны более широкое. Слабое развитие на территории зоны отложений верхнеплиоценового и четвертичного возраста обусловило проявление в надсолевых толщах куполов на современной поверхности интенсивной системы разрывных нарушений (сбросов и грабенов), что отражено на геологической карте.

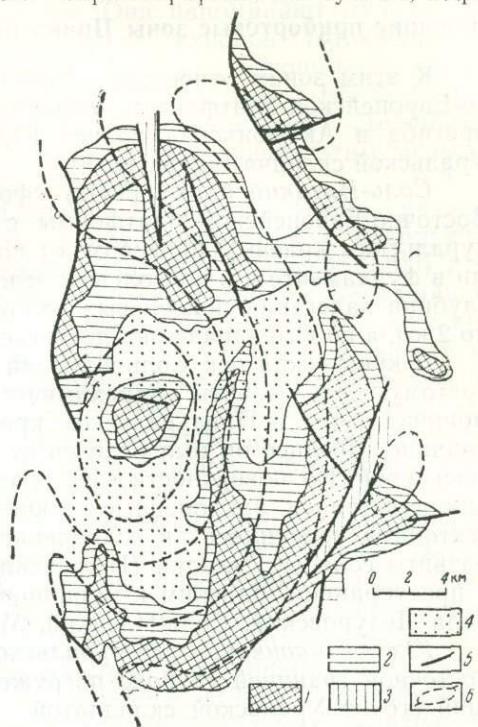


Рис. 12. Тектоническая схема Егиндинской группы соляных куполов (по Б. А. Соловьеву, 1966 г.)

1 — своды соляных куполов; 2 — крылья соляных куполов; 3 — грабены; 4 — первичные компенсационные мульды; 5 — разрывные нарушения; 6 — изоаномалии силы тяжести

Не менее интенсивно разрывные нарушения, видимо, развиты в надсолёвых толщах куполов в Центральной и Хобдинской зонах, но их маскируют там большой мощности верхнеплиоценовые и четвертичные отложения.

Внешние прибрежные зоны Прикаспийской впадины¹

К этим зонам относятся Соль-Илецкий опущенный блок Восточно-Европейской платформы, южное окончание Предуральского краевого прогиба и Актубинская полоса Южного периклинального прогиба Уральской складчатой системы.

*Соль-Илецкий блок*² (VIII) сформировался в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы с Прикаспийской впадиной и Предуральским краевым прогибом, от которых он отделен резкими уступами в фундаменте и в подсолевых отложениях (см. рис. 1). Минимальная глубина залегания подсолевых отложений на востоке блока примерно 2 км, а на юго-западе она достигает 5 км.

В кунгурский век Соль-Илецкий блок был захвачен погружением, поэтому здесь развиты гидрохимические осадки кунгура, но в меньшей мощности, чем в Предуральском краевом прогибе и в Прикаспийской впадине. Позднее он был отделен от Прикаспийской впадины Илекской флексурой. На поверхности здесь развиты отложения верхней перми и нижнего триаса, наклоненные на юго-восток. В пределах блока соляная тектоника проявилась в ослабленном виде. В восточной его части развиты соляные складки (Нежинская, Сулакская, Красноярская и др.) с простиранием, близким к меридиональному, а в западной части — купола Дедуровский, Соль-Илецкий, Мертвосольский и др.

Южное окончание Предуральского краевого прогиба (IX) имеет восточной границей глубоко погруженный структурный шов, отделяющий его от Уральской складчатой зоны и Южного периклинального прогиба Урала (см. рис. 1). Западная граница прогиба по данным гравиразведки фиксируется зоной сгущения изоаномал. Этой гравитационной ступени по данным сейморазведки соответствует глубинный разлом.

Предуральский краевой прогиб имеет асимметричное строение с пологим западным и крутым восточным крыльями. Его древнее платформенное основание наклонено к востоку. К югу в связи с общим погружением Уральской складчатой системы Предуральский краевой прогиб становится все более пологим и в северо-восточной части Прикаспийской впадины затухает. В течение мезозоя и кайнозоя эта область являлась прибрежной зоной Прикаспийской впадины.

К востоку от гравитационной ступени, на Урало-Сакмарском междуречье и на левобережье Урала, развиты отложения верхней перми и нижнего триаса. В этих отложениях прослеживаются пологие меридионально ориентированные складки, осложненные проявлениями соляной тектоники. Своды ряда антилиналей сопровождаются узкими линейными мульдами оседания — «дизъюнктивными мульдами», выполненными мезозайско-кайнозайскими отложениями. К бассейну р. Илек полоса меридиональных складок, образованных отложениями верхней перми и нижнего триаса, погружается и скрывается под сплошным покровом пологозалегающих слоев верхнего триаса и нижней юры. Однако и на их фоне оконтуриваются меридионально ориентированные мульды,

¹ Внешние прибрежные зоны, примыкающие к Волгоградскому и Жадовскому уступам, не рассматриваются, так как они лишены соляных структур.

² Этот блок иногда называют Приоренбургским (Кожевников, 1962) или Мертвосольским (Журавлев, Шлезингер, 1962).

выполненные среднеюрскими и нижнемеловыми, реже верхнемеловыми и палеогеновыми породами.

Мезо-кайнозойские мульды являются типичными структурами оседания, образующимися в результате поверхностного или подземного выщелачивания гипсов и солей кунгтура, слагающих ядра верхнепермско-триасовых антиклинальных складок. Они напоминают мульды оседания, развитые над сводами некоторых куполов Прикаспийской впадины (Журавлев, 1963), но отличаются от них закономерно выдержаными простирациями и более древним заложением. Борта некоторых из этих мульд осложнены продольными сбросами. Линейность мульд наблюдается лишь там, где линейны отвечающие этим мульдам на глубине антиклинальные складки.

Южнее, на левобережье р. Илек, где преимущественно развиты нижнемеловые отложения, мульды не прослеживаются и появляются первые соляные купола. На междуречье Малой и Большой Хобды и до пос. Ново-Алексеевка эти купола приурочены к линиям меридионального простириания. К западной границе зоны, меридионально ориентированных куполов (приблизительно по меридиану $55^{\circ}30'$), под острым углом подходят восточные полосы соляных структур Узени-Илекской зоны. Южнее широты пос. Ново-Алексеевка структуры, свойственные южному окончанию Предуральского краевого прогиба, не прослеживаются. Локальные аномалии силы тяжести здесь меняют субмеридиональное простириание на юго-восточное и широтное.

Актюбинская полоса Южного периклинального прогиба Уральской складчатой системы (Х) расположена к востоку от Предуральского краевого прогиба, отделяясь от него глубоко погруженным структурным швом (см. рис. 1). В отложениях верхнего палеозоя и нижнего триаса здесь наблюдаются узкие линейные складки субмеридионального простириания, вытянутые на большие расстояния и образующие выдержаные линии антиклиналей. П. Я. Авровым (1957) в Актюбинском Приуралье намечено пять таких линий антиклинальных складок. Западные их крылья более крутые, осложнены надвигами и глубоко погружены.

Присутствие в разрезе галогенных пород кунгурского возраста привело к осложнению первичных складок — росту соляных куполов. Красноцветные породы верхней перми почти полностью прорваны солью. Мощность соли в ядрах куполов достигает 3,5 км. Соляные ядра их часто имеют козырьковое строение. Козырек этих соляных ядер обращен на запад. Отмечается несовпадение сводов складок по кунгурским и артинским отложениям.

Для Актюбинского Приуралья характерны мульды оседания. Многие из них являются наложенными (Волчегурский, Журавлев, 1965), так как слагающие их породы непосредственно перекрывают отложения кунгурского яруса. Большинство из мульд заложилось в юрское время.

На юг складки Южного периклинального прогиба Уральской складчатой системы протягиваются до широты купола Кенкияк и здесь застухают, переходя в отдельные соляные купола, располагающиеся уже в пределах собственно Прикаспийской впадины.

ОСОБЕННОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ, СТРОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СОЛЯНЫХ СТРУКТУР ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЫ

Размещение и основные формы соляных структур в прибрежных и внутренних частях Прикаспийской впадины различны.

В Приволжской и Узени-Илекской прибрежных зонах ориентировка соляных структур линейная, совпадающая с простирианием бортов

впадины. Такое их расположение обусловлено разрывами в фундаменте и подсолевом ложе. Образование разрывов, как и бортового уступа, связано с формированием впадины и ступенчатым погружением фундамента. Ориентированность соляных структур возникла при направленном течении соли в зоне разрывов или флексур подсолевого ложа, развивавшихся унаследованно над разрывами фундамента.

В восточной части впадины, в конце палеозоя представлявшей южное окончание Предуральского краевого прогиба и Южный перекликальный прогиб Уральской складчатой системы и вошла в пределы впадины лишь в мезозойское время, возникновение линейных субмеридионально вытянутых складок связано с формированием этих прогибов. Складки образованы слоями верхнего палеозоя и нижнего триаса, западные их крылья крутые и нарушены разрывами. Вследствие наличия в нижней перми галогенных отложений кунгура первичные складки позднее были осложнены проявлениями соляной тектоники. Нагнетание соли при этом происходило в сторону западных нарушенных разрывами крыльев, что привело к несовпадению вершин ядер соляных куполов и сводов первичных складок и к формированию у первых козырьков, обращенных на запад, в сторону впадины.

В юго-восточной части Южно-Эмбенской зоны соляные купола, также расположенные линейно, приурочены к разрывам в подсолевых отложениях. Падение поверхности сбрасывателей этих разрывов, преимущественно с запада на восток, согласуется с направлением падения главного разлома в зоне сочленения Прикаспийской впадины с погребенной герцинской складчатой системой.

Из рассмотренного следует, что размещение и формирование соляных структур в Приволжской, Узени-Илекской и юго-восточной части Южно-Эмбенской прибортовых зон, как и в южном окончании Предуральского краевого прогиба и в Южном перекликальном прогибе Уральской складчатой системы, определялось тектоническим воздействием на соленосную толщу разрывных и складчатых нарушений подсолевого ложа.

Исключением является южная окраина впадины (западная часть Южно-Эмбенской зоны и Сарпинско-Енотаевская зона), в пределах которой линейности в расположении соляных структур не отмечается, и соляная тектоника, особенно в Сарпинско-Енотаевской зоне, проявляется более интенсивно. Указанные особенности были обусловлены здесь, по-видимому, разнонаправленным падением поверхности фундамента, подсолевого ложа и слоев мезо-кайнозоя. Это устанавливается по данным сейсморазведки для участков впадины, примыкающих к Южно-Эмбенскому и Астраханскому региональным гравитационным максимумам. Фундамент и мезо-кайнозойские отложения наклонены здесь на юг, а породы подсолевого ложа на север. Соответственно с этим мощность доюрских (триасовых и верхнепермских) отложений подсолевого комплекса и толщи соли резко возрастает в сторону впадины.

Во внутренней части впадины (в Центральной, Эмбенской и Хобдинской зонах) соляные купола группируются вокруг межкупольных депрессий в виде дугообразных и кольцевых цепочек. Такое расположение соляных куполов отчетливо видно на геологической карте со снятым верхнеплиоцен-четвертичным покровом, а в восточной части впадины на предчетвертичном срезе. На глубине соляные массивы куполов соединяются соляными перемычками и образуют кольцевые массивы. Процесс их образования наглядно прослеживался и в опытах. На гравиметрической карте это отражается в мозаичном расположении локальных аномалий силы тяжести, тогда как в бортовых частях впадины (исключая южную окраину) они ориентированы линейно.

Форма соляных структур в разных зонах впадины различна и зависит от интенсивности проявления соляной тектоники, т. е. от масштаба

перераспределения соли. Последний определяется величиной мощности соли и надсолевых толщ и разностью плотности их пород.

Возрастание глубин залегания кристаллического фундамента и подсолевого ложа от бортов впадины к центральной части обусловливает увеличение первоначальных величин мощностей солевого и надсолевого комплексов. В прибортовых частях впадины подсолевое ложе залегает на глубинах 2,5—5 км, а в центральной части достигает 10—11 км. Соответственно в первых первоначальная мощность соли была равна 1—2 км, а надсолевых толщ 2—3 км; во второй — мощность соли оценивается в 3—4 км и надсолевых толщ в межкупольных депрессиях в 9—10 км.

Разность плотности соли и надсолевых толщ также увеличивается к центральной части впадины, где в галогенной толще отмечается меньшее содержание сульфатных, карбонатных и терригенных пород. С увеличением мощности отложений солевого и надсолевого комплексов и разности их плотности к внутренним частям впадины интенсивность соляной тектоники возрастает. Это отражается в образовании в разных ее зонах различных форм соляных массивов и соляных структур в надсолевых толщах. Во внутренних зонах впадины эти формы более развиты и более сложные, чем в периферических частях.

О строении соляных структур, расположенных в непосредственной близости к борту впадины, дает представление наиболее изученный бурением и геофизикой юго-восточный участок Южно-Эмбенской зоны. На востоке этого участка соляная тектоника проявилась слабо. Глубина залегания подсолевых отложений здесь 2—2,5 км, первоначальная мощность соли менее 1 км, а надсолевых толщ 1,5—2 км. Соляные поднятия на этом участке не имеют настоящих соляных ядер. Они представлены так называемыми «соляными подушками» с глубинами залегания кровли соли над вершинами соляных тел 1,5—1,8 км. Слои надсолевых отложений на соляном теле залегают согласно и вверх по разрезу выполняются. В связи с этим поднятия в надсолевых отложениях характеризуются большими поперечными размерами. Структуры этого типа немногочислены, к ним относятся поднятия Алибекмала, Женажол, Синельниковское, Чудовское, Куантай и др. Они являются как бы переходными между брахиформными платформенными складками и типичными соляными куполами.

Далее в сторону внутренней части впадины, в пределах юго-восточной части Южно-Эмбенской зоны, размещены соляные купола, в формировании которых соляная тектоника играет большую роль. Эти купола приурочены к четырем тектоническим линиям, параллельным борту впадины, и образуют ряды цепочек. Глубина залегания подсолевого ложа здесь возрастает до 2,5—5 км, мощность соли до 1—2 км, а надсолевых толщ до 2—3 км.

В сторону впадины соляные купола линейных цепочек характеризуются увеличением высоты соляных массивов и степени прорыва ими пород верхней перми. Поперечные размеры куполов и размеры межкупольных депрессий также возрастают. Поперечные размеры куполов при этом остаются меньшими в сравнении с размерами межкупольных депрессий. В межкупольных депрессиях, по сейсмическим данным, отмечается почти полное выклинивание соли и развитие по верхнепермским отложениям обращенных межкупольных поднятий. Эти поднятия пассивные, они лишены соли и сопряжены с вторичными компенсационными мульдами, будучи образованы их внешними крыльями. Компенсационные мульды, а следовательно, и обращенные межкупольные поднятия образовались во время отложения верхней части верхнепермских слоев.

Рост соляных куполов в Южно-Эмбенской зоне в основном закончился в конце перми, о чём свидетельствует повсеместное наличие над

кровлей соляных массивов отложений нижнего триаса, которые на крыльях этих структур залегают на различных горизонтах татарского яруса верхней перми. В связи с ростом куполов соленосные отложения к концу перми были полностью выжаты из межкупольных депрессий. Накопление нижнетриасовых отложений сопровождалось весьма медленным подъемом соляных массивов куполов, на что указывает уменьшение мощности ряда свит нижнего триаса в сводах куполов и возрастание ее к крыльям. Медленный подъем соляных массивов в раннетриасовое время происходил при перераспределении соли в их пределах. Мощность юрских и меловых отложений над смежными куполами и межкупольными депрессиями остается постоянной. Это объясняется тем, что рост соляных куполов в послераннетриасовое время в рассматриваемом районе не происходил.

В северной и западной прибортовых частях впадины (Приволжская, Узени-Илекская зоны) соляные структуры представлены полосами соляных антиклиналей, осложненных соляными куполами, ориентированными вдоль бортовых уступов. Этим соляным структурам на глубине соответствуют линейно вытянутые соляные массивы, осложненные соляными вздутиями (вершинами).

По мере движения от бортового уступа к внутренней части впадины в этих полосах отмечается усиление интенсивности соляной тектоники, которое выражается: в увеличении высоты соляных массивов куполов от 1,2 до 4,5—5 км; в уменьшении глубин их залегания от 0,8—1,5 км до выхода (в редких случаях) на доверхнеплиоценовую или современную поверхность; в возрастании амплитуды поднятий в надсолевых отложениях и в большей их раздробленности.

Скважины, заданные в сводах некоторых куполов, на глубине 800—1000 м под породами нижнего триаса вскрыли соляные массивы. Это свидетельствует о том, что рост куполов в Приволжской и Узени-Илекской зонах в основном закончился в позднепермское время. Выход в сводах ряда куполов на доверхнеплиоценовую или современную поверхность отложений кунгура отвечает соляным шипам, высоко поднимающимся над глубоко залегающими соляными массивами. Соляные шипы образовались при перераспределении соли в соляных массивах в юрско-палеогеновое и неоген-четвертичное время.

При движении от Южно-Эмбенской зоны на север и северо-запад в глубь Эмбенской зоны постепенно возрастают глубина залегания подсолевого ложа от 5 до 8 км, первичная мощность отложений солевого и надсолевого комплексов и интенсивность соляной тектоники.

Эмбенская зона, расположенная во внутренней части впадины, по интенсивности проявления соляной тектоники обнаруживает переходные черты между Южно-Эмбенской прибортовой и Центральной зонами. Соляные купола в Эмбенской зоне разнообразны по морфологии и размерам и сильно осложнены системой разрывных нарушений. Нередко они соединяются еле заметными пережимами, образуя на поверхности предверхнеплиоценового среза кольцевые цепочки. Этим пережимам на глубине соответствуют соляные перемычки, которые связывают соляные массивы куполов в кольцевые массивы. Последние вместе со смежными кольцевыми массивами образуют систему ячеек. Слоны соляных массивов осложнены уступами, иногда подвернутыми (купол Макат).

Размеры соляных массивов куполов в рассматриваемой зоне обычно невелики и несколько меньше размеров межкупольных депрессий. Купола большей частью скрытопрорванные (с закрытыми соляными массивами). В сводах открытых куполов Каракунгул и Ащебулак обнажены вершины соляных шипов, поднимающихся над соляными массивами. Среди закрытых выделяются купола, соляные массивы которых прорывают только верхнепермские слои. Над их вершинами прослежи-

ваются верхние горизонты верхнепермско-триасового структурного этажа надсолевого комплекса. Мощность этих слоев над вершинами массивов, по сравнению с разрезами в межкупольных депрессиях, сокращена. Более многочисленны купола, у которых соляные массивы прорывают также частично и отложения юрско-палеогенового структурного этажа надсолевого комплекса. Вершины таких соляных массивов прослеживаются на глубине 100—700 м, иногда глубже.

В Хобдинской зоне соляная тектоника несколько ослаблена. Соляные массивы куполов на предверхнеплиоценовую поверхность выходят редко. Обычно они прорывают только отложения верхнепермско-триасового или частично и юрско-палеогенового структурного этажа. По форме соляные структуры представлены главным образом мелкими однокрылыми соляными куполами и реже соляными валами. На поверхности предверхнеплиоценового среза, как и в других внутренних зонах, они образуют кольцевые цепочки вокруг межкупольных депрессий. Поперечные размеры соляных структур меньше размеров межкупольных депрессий.

Центральная зона характеризуется наиболее интенсивным развитием соляной тектоники. Подавляющее большинство куполов прорваные (открытые) и имеют большие поперечные размеры. Соляные массивы этих куполов выходят на доверхнеплиоценовую поверхность. Развиты также скрытопрорванные купола (закрытые), соляные массивы которых прорывают частично отложения юрско-палеогенового структурного этажа. Обычно эти соляные купола небольших размеров. Соляные структуры разнообразны и представлены куполами-гигантами, валами, куполами и соляными перемычками. На поверхности предверхнеплиоценового среза четко видно дугообразное и кольцевое расположение их вокруг межкупольных депрессий. На глубине они соединяются соляными перемычками и образуют кольцевые массивы. Слоны соляных массивов осложнены уступами. В некоторых случаях наблюдается два яруса карнизов: в верхней части верхнепермских отложений и на поверхности предакчагильского среза (купола Индер, Круглый, Челкар и др.). Поперечные размеры соляных массивов куполов часто пре-восходят размеры межкупольных депрессий.

Для внутренних зон впадины общим является наличие в межкупольных депрессиях глубоко погруженных соляных структур второй генерации. По строению соляных ядер они представлены пассивными соляными поднятиями и небольшими скрытопрорванными куполами, ядра которых прорывают верхнепермские отложения (Соловьев, 1966а). В первом случае нижние горизонты верхнепермско-триасового структурного этажа полого изогнуты и повторяют очертание остаточной линзы соли в межкупольной депрессии, во втором — соль остаточной линзы прорывает в меньшей или большей степени отложения этого этажа. В полукольцевом массиве Егиндинской группы куполов Эмбенской зоны выявлен небольшой купол Шокпарсай — единственный пример межкупольной структуры прорванного типа.

В ряде межкупольных депрессий внутренних зон соленосные отложения полностью выжаты. Здесь весь объем соли вобрали соляные массивы куполов, обрамляющие межкупольные депрессии. Межкупольные депрессии внутренних зон впадины в зависимости от интенсивности соляной тектоники подразделяются на обрамленные и раскрытие. Первые чаще встречаются в Центральной зоне впадины. Раскрытие межкупольные депрессии на более глубоких срезах превращаются в обрамленные (обрамлены соляными кольцевыми массивами).

В развитии соляных структур Прикаспийской впадины намечаются крупные этапы, разделы между которыми совпадают с границами структурных этажей, выделенных в составе надсолевых отложений. Та-

ковыми являются позднепермско-триасовый, юрско-палеогеновый и неоген-четвертичный этапы.

Позднепермско-триасовый этап проявился во всех зонах впадины. В течение этого этапа сформировалось большинство куполов, а в пределах внутренней части впадины у некоторых из них (Индер, Круглый, Челкар и др.) даже образовались навесы. В юго-восточной части Южно-Эмбенской зоны и на южной окраине впадины небольшое количество куполов в конце пермского времени прекратили развитие в стадии

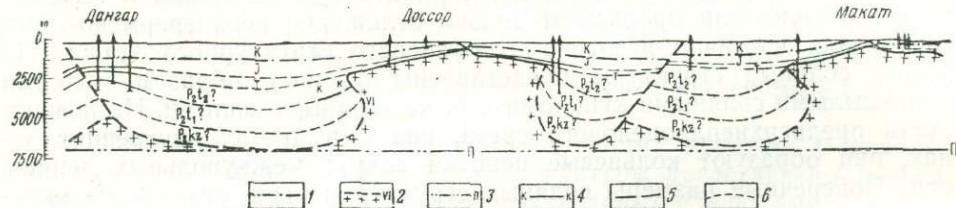


Рис. 13. Строение куполов и межкупольных мульд по профилю Дангар—Доссор—Макат (по Ю. С. Кононову, 1961)

1 — третий отражающий горизонт (подошва неокома); 2 — шестой отражающий горизонт (кровля соли); 3 — подошва соли по сейсмическим данным; 4 — отражающий горизонт в разрезе верхней перми; 5 — сбросы; 6 — предположительные границы между толщами

«соляной подушки». Юрско-палеогеновый этап отмечался в основном во внутренних зонах, а неоген-четвертичный главным образом в Центральной зоне, где мощность отложений этого этажа наибольшая. Неоген-четвертичный этап в дальнейшем почти не рассматривается, так как характеристика соляных структур приводится по геологической карте со снятием этих отложений.

Интенсивность проявления соляной тектоники в разные этапы формирования соляных структур была различной. Эти различия выявляются при рассмотрении строения соляных структур внутренних зон, образованных в пермско-триасовый и в юрско-палеогеновый этапы.

Рассмотрим строение тех частей соляных структур, которые сформировались во внутренних зонах в позднепермско-триасовый этап. Особенностью строения верхнепермско-триасового (нижнего) этажа надсолевого комплекса является резкое колебание мощностей верхнепермских пород в пределах соляных куполов и смежных с ними межкупольных депрессий. По сейсмическому профилю Эмбенской зоны через купола Макат-Доссор-Дангар мощность верхнепермских пород за вторыми крутыми уступами соляных массивов куполов (отвечающими верхнепермско-триасовому этажу) и в центральных частях межкупольных депрессий составляет 3 км (рис. 13). Эта цифра определяет и амплитуду поднятия соли в Эмбенской зоне за рассматриваемый этап. На поверхности же соляных массивов куполов верхнепермские породы отсутствуют и нижним членом надсолевого разреза являются триасовые отложения.

Соляные массивы, прорывающие верхнепермские породы как в Эмбенской, так и в других внутренних зонах впадины, характеризуются крупными (в плане) размерами и большой амплитудой поднятия. Верхнепермские породы, особенно вблизи вторых крутых уступов соляных массивов, сильно дислоцированы. Триасовые отложения на верхнепермских слоях залегают несогласно и более полого.

Позднепермско-триасовый этап являлся главным в формировании соляных структур для всей Прикаспийской впадины. В это время при гравитационном воздействии на соль перекрывающих ее более плотных пород был перераспределен основной объем соли. Вначале участки подъема соляных масс могли быть приурочены к крупным подсолевым структурам или к зонам сокращенной мощности верхнепермских отло-

жений и во много раз превышали по площади размеры современных соляных массивов. В дальнейшем, при росте соляных структур, разность нагрузки верхнепермских пород на соляной массив и окружающие его участки увеличивалась и интенсивность их роста возрастила. Первоначальная мощность верхнепермско-триасовых слоев, разность нагрузок которых обусловила перемещение соли, сейчас искажена и может быть оценена не менее 4 км. На увеличение интенсивности роста куполов в конце перми указывает повышение содержания местного обломочного материала в слоях верхнетатарского подъяруса, обусловленное размывом сводов куполов. Конец перми в Прикаспийской впадине характеризовался прорывом соляными массивами куполов верхнепермской толщи, что привело к восстановлению гравитационного равновесия. В триасовое время перемещения были незначительны и соляные массивы только приподнимают эти слои.

К концу позднепермско-триасового этапа во многих случаях соль была полностью выжата из межкупольных депрессий; сформировались соляные массивы куполов, как обрамляющие межкупольные депрессии, так и развитые внутри депрессии купола второй генерации, а также сопряженные с последними вторичные компенсационные мульды. Тем самым в целом для впадины определился современный план расположения соляных структур.

В внутренних зонах впадины в пределах верхнепермско-триасового этажа соляные массивы куполов соединены соляными перемычками в кольцевые массивы и образуют сеть ячеисто-сотового строения. Положение отдельных элементов этой сети, возможно, было предопределено разрывами подсолевого ложа. Межкупольные депрессии, сложенные надсолевыми отложениями, имеют форму чаши и четко обособлены друг от друга обрамляющими их соляными массивами.

В последующие этапы интенсивность соляной тектоники ослабевала и площадь ее проявления во впадине сокращалась. В юрско-палеогеновый этап амплитуда поднятия соли в ядрах куполов была небольшой. Для Эмбенской зоны она не превышала 1 км, в среднем же изменялась от 300 до 500 м. В Центральной зоне амплитуда их несколько больше. При этом длительность формирования соляных структур в юрско-палеогеновый этап значительно превышает продолжительность позднепермско-триасового этапа.

Формирование соляных массивов куполов в юрско-палеогеновый этап происходило благодаря перераспределению соли в массивах, образовавшихся в позднепермско-триасовый этап. На теле верхнепермских соляных массивов в это время образовались меньшие по размеру вторичные соляные массивы, которые в той или иной степени дислоцировали отложения юрско-палеогенового этажа (рис. 14). Новое поступление соли в соляные массивы куполов при этом если и происходило, то только вследствие выдавливания ее под действием нагрузки более плотных верхнепермских пород из тех участков межкупольных депрессий, откуда они не были выдавлены на первом этапе формирования соляных массивов. Отложения юрско-палеогенового этажа, нарушенные поднимающимися вторичными соляными массивами, залегают полого и угол несогласия их с более дислоцированными породами верхней перми достигает 20° . С юрско-палеогеновым этапом было связано образование вдавленных мульд между отдельными вершинами соляного массива и дальнейшее формирование сопряженных компенсационных мульд. Во внутренних зонах впадины в этом структурном этаже кольцевые массивы выражены менее четко. Это связано с тем, что уровень подъема соли, особенно в пределах соляных перемычек, был меньшим.

Из сравнения амплитуд подъема соляных массивов куполов, их размеров в плане и степени дислоцированности соответствующих толщ видно, что интенсивность роста куполов в юрско-палеогеновый этап в

сравнении с верхнепермско-триасовым резко уменьшилась. Это объясняется тем, что основной объем соли к началу юрско-палеогенового этапа из межкупольных депрессий был уже перемещен. Уменьшение тем-

пов роста соляных массивов обусловлено и меньшей мощностью мезо-кайнозойских отложений (в два раза меньше мощности верхнепермско-триасовых).

Существенной причиной ослабления интенсивности соляной тектоники является и меньшая плотность пород мезо-кайнозоя. Плотность их иногда снижается до 1,8—2,2 г/см³ и примерно равна плотности соли, тогда как плотность верхнепермских пород равна 2,5—2,6 г/см³ (Кононов, 1961). Уменьшение плотности мезо-кайнозойских пород приводит к снижению разности плотности соли и перекрывающих ее пород, а отсюда к замедлению скорости роста соляных структур.

Таким образом, основной причиной формирования соляных структур в Прикаспийской впадине является гравитационное воздействие на соль перекрывающих ее более

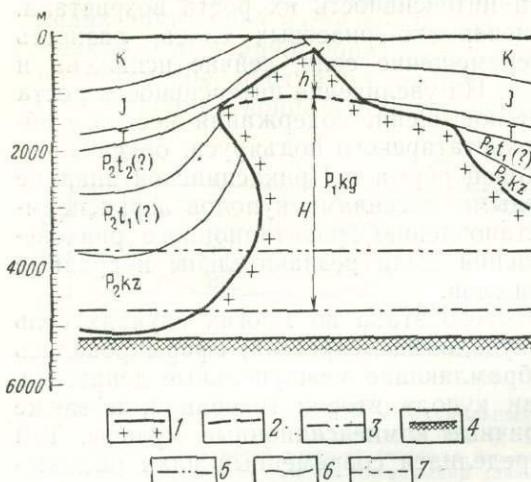


Рис. 14. Схема формирования соляного массива купола. По Ю. С. Кононову (1961) с дополнениями В. С. Журавлева (1963) 1 — современное положение кровли соляного массива; 2 — предполагаемое положение кровли соляного массива в конце позднепермской эпохи; 3 — первоначальное положение кровли соляного массива в конце позднепермской эпохи; 4 — первоначальное положение кровли соленосной толщи по Ю. С. Кононову; 5 — (первоначальное положение кровли соленосной толщи по В. С. Журавлеву); 6 — граница между толщами; 7 — разломы; H — амплитуда подъема соляного массива в позднепермскую эпоху; h — амплитуда подъема соляного массива в мезо-кайнозое

плотных пород. При этом наиболее активную роль играли верхнепермские отложения. Возникновение в этих условиях первичных неровностей, на основе которых развивались соляные купола, возможно при неравномерном распределении нагрузки на соль. Первичная разность нагрузок могла определяться неровностями подсолевого ложа или неравномерной первоначальной мощностью солевых и надсолевых отложений. Эти факторы зависят от тектонического строения впадины. Погружение к внутренним частям впадины поверхности подсолевого ложа обусловило региональное увеличение мощности соли и надсолевых толщ в этом направлении, а в связи с этим возрастание интенсивности соляной тектоники и различие форм соляных структур в разных зонах.

Линейную ориентировку соляных структур в бортовых частях впадины определили разрывные нарушения подсолевого ложа. Размещение соляных структур на предверхнеплиоценовой поверхности среза внутренних зон в виде кольцевых цепочек вокруг межкупольных депрессий связано с закономерностями гравитационного перемещения (см. стр. 67—73). Первичные неровности, лежащие в основе соляных структур, здесь, видимо, также возникали над разрывными нарушениями или поднятиями подсолевого ложа.

Итак, механизм образования соляных структур обусловлен в основном инверсией плотностей горных пород, но определенное влияние на него оказывает и тектоническое строение впадины. Тектоника подсолевого ложа в известной степени обуславливает различный характер размещения и строения соляных структур в бортовых и внутренних частях впадины.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

КРАТКИЙ ОБЗОР ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ СТРУКТУР ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Изучение процесса формирования соляных структур путем моделирования проводилось рядом исследователей и выполнялось на физических моделях, созданных из эквивалентных материалов, или на математических (теоретических) моделях. Выявление закономерностей формирования соляных поднятий является частью вопроса, рассматривающего характер развития неустойчивости при инверсии плотности горных пород, приводящей к образованию структур нагнетания.

Развитие гравитационной неустойчивости сначала изучалось на жидкостях. Х. Г. Бенард (Benard, 1900) исследовал развитие неустойчивости на примере стационарной конвекции в одной жидкости. Он экспериментально установил, что в подогреваемом снизу слое жидкости в связи с понижением ее плотности развивается движение, которое разбивается на ячей (ячей Бенарда). Математический анализ развития неустойчивости на границе раздела двух жидкостей различной плотности был дан Рэлеем (Rayleigh, 1900, 1916) и позже Г. Тэйлором (Taylor, 1950), после чего конвективная неустойчивость в обычных жидкостях получила название неустойчивость Рэля — Тейлора. Теория неустойчивости Рэля — Тейлора применима и при изучении закономерностей формирования соляных структур.

С. Аррениус (Arrhenius, 1912) впервые пытался теоретически объяснить образование соляных структур силами гравитации. Л. Л. Неттлетон (Nettleton, 1934) исследовал механизм этого процесса на моделях из вязких жидкостей различного цвета и плотности (битум и сахарный сироп). Опыты Л. Л. Неттлетона позволили судить о качественной стороне процесса. С этого времени гравитационная теория образования соляных структур стала общепризнанной. В дальнейшем М. К. Хабберт (Hubbert, 1937), исходя из предположений Л. Л. Неттлетона, предложил использовать общую теорию физического подобия для оценки результатов моделирования с количественной стороны.

Моделирование процесса формирования соляных куполов продолжили за рубежом М. Б. Добрин (Dobrin, 1941), Л. Л. Неттлетон (Nettleton, 1943), Л. Л. Неттлетон и Т. А. Элкинс (Nettleton, Elkins, 1947), Т. Д. Паркер и А. Н. Мак-Доузлл (1955) и др., а в Советском Союзе оно впервые было проведено в лаборатории тектонофизики МГУ Н. Б. Лебедевой (1956). В опытах этих исследователей для имитации соли использовались вязкие жидкости (асфальт), а для надсолевых отложений как жидкость (патока), так и сыпучие материалы (мягкий ил).

Асфальт и мягкий ил, использованные в опытах Т. Д. Паркера и А. Н. Мак-Доузлла, имеют ряд преимуществ, так как позволяют искусственно регулировать процесс роста куполов и даже останавливать этот рост на любой стадии. При этом можно наблюдать также пластические и разрывные нарушения в покрывающих породах. Недостатком названных материалов является их непрозрачность, что мешает следить за процессом роста куполов. Возникновение отдельных

куполов в опытах этих исследователей вызывалось рядом факторов: неровностями первичной поверхности асфальта, изменениями толщины или плотности слоя нагрузки, деформациями слоя нагрузки. В этих опытах течение материала в сторону купола вызывало образование вокруг него на поверхности асфальта краевой впадины. После этого у внешнего края впадины появлялись вторичные купола.

Т. Д. Паркер и А. Н. Мак-Доуэлл сделали вывод, что, по-видимому, нет необходимости искать особую причину для объяснения возникновения каждого купола и не следует ожидать линейного расположения соляных куполов, если многие из них имеют вторичное происхождение. В опытах этих исследователей диаметр куполов в моделях оказался примерно равным мощности исходного слоя, из которого они образовались. Они указывают, что если в природе существуют аналогичные соотношения между диаметром куполов и мощностью исходного слоя, то мощность слоя соли в солянокупольной провинции прибрежной равнины Мексиканского залива должна иметь несколько тысяч футов.

По данным Н. Б. Лебедевой (1956), зарождение куполов наблюдалось и при отсутствии дифференцированной нагрузки на жидкость, имитировавшей соль, и связано, по-видимому, с состоянием неустойчивого равновесия всей системы. Достаточно было небольшого увеличения градиента давления для того, чтобы началось перетекание легкой жидкости снизу вверх. В опытах Н. Б. Лебедевой воспроизвился рост одиночных и групповых соляных куполов и было выявлено значение мощности и вязкости соли и надсолевых толщ на скорость процесса.

В Советском Союзе с 50-х годов разрабатываются теоретические основы моделирования тектонических явлений. Условия подобия были выведены М. В. Гзовским (1960, 1963) новым методом на основании реологических уравнений и разработанной в СССР общей теории подобия физических процессов (Кирпичев, 1953). Работы М. В. Гзовского имеют значение и для моделирования процесса гравитационного всплытия соляных куполов.

Американскими геофизиками проведен ряд теоретических работ по определению формы и степени деформации границы между солью и перекрывающими ее породами. Формулы, предложенные ими, относятся только к первоначальной фазе роста соляных структур.

В работе Ц. Дэйниса (Danes, 1964) дается математическая формулировка динамики роста соляных куполов, развитие которых он рассматривает как частный случай неустойчивости Тейлора. Он предполагает, что соль и осадок ведут себя как вязкие среды. Из всего спектра бесконечно малых возмущений, возникающих на границе неустойчивости, Ц. Дэйнис выделяет нарушение устойчивого роста (доминантное нарушение). По мере роста деформации оно выступает более четко и определяет форму купола. Доминантное нарушение определяет также расстояние между куполами, которые возникают в результате первоначальной деформации.

М. А. Байот и Г. Оид (Biot and Ode, 1965) дали математический анализ гравитационной неустойчивости в плоскостном измерении для простой двухслойной модели при жестком горизонтальном основании. Физически важными параметрами развития неустойчивости, по данным этих исследователей, являются величины вязкости и мощности надсолевых пород и соли и относительный прирост их плотности. Эти параметры определяют степень кривизны извилистой, имеющей синусоидальную форму, границы между солью и перекрывающими породами, длину доминантного нарушения, и время, в течение которого происходит образование синусоидального искривления.

Ф. Селинг (Seling, 1965) рассматривает теоретические предпосылки образования соляного купола. Для двухмерной и трехмерной модели

он получил формулы, определяющие скорость роста и число волн с физическими и геометрическими их параметрами. Показано, что существует определенная длина волны, для которой скорость роста достигает наибольшей величины. В ходе процесса эта компонента доминирует и контролирует конечную форму модели.

Ф. Селинг и Е. Вермунд (*Seling and Wermund, 1966*) приводят уравнения зависимости расстояния между куполами от первичной мощности соли и коэффициента ее вязкости. Применительно к соляным куполам прибрежной части Мексиканского залива они дают цифровые решения для указанных зависимостей и отмечают, что купола не только сами растут вверх от первоначального нарушения, но и приводят в движение соседние участки, образуя на краю прогиба, окружающего центральный купол, периферические купола. Эти последние располагаются вокруг первичного купола по окружности.

Некоторые проявления конвективной неустойчивости в грунтах с физической точки зрения рассмотрены Е. В. Артюшковым (1963, а, б; 1964; 1965). Им определены основные условия и общие закономерности развития конвективной неустойчивости в грунтах, а также зависимость морфологии конвективных структур от свойств пород.

Интересные экспериментальные исследования с применением центрифуги провел Х. Рамберг. В одной работе (*Ramberg, 1963*) он рассматривает некоторые вопросы теории моделирования и указывает на большое значение эффекта гравитационного конвективного течения в слоях земной коры. Он считает, что при образовании диапировых куполов, интрузий и структур, подобных подводным хребтам, системам рифтовых долин и складчатости в геосинклиналях, фактор гравитационного всплыивания материала в условиях инверсии плотности пород имеет большое значение. Эти структурные формы были воспроизведены им на моделях из воска, прыгающей замазки и модельной глины.

В других работах Х. Рамберг (*Ramberg, 1965, 1966*) описывает изученные им каледониды Скандинавии, которые были смоделированы им на центрифуге. Путем воздействия на вязко-пластичные материалы центробежной силы он воспроизвел структуры складчатых зон — каледонид Скандинавии, Аппалачей, Анд и Альп и пришел к выводу, что складчатые зоны развиваются вследствие гравитационной неустойчивости. Еще одна работа Х. Рамберга (*Ramberg, 1968*) является теоретическим разбором характера развития неустойчивости в первоначальной ее фазе. Он приводит уравнения, в которых указаны факторы, влияющие на возможную доминирующую длину волны и скорость ее развития. По существу последнее исследование дает мало нового по сравнению с рассмотренными выше работами М. А. Байота, Ц. Дэйниса, Г. Оиде и Ф. Селинга.

Г. Вундерлих (*Wunderlich, 1967*) рассматривает причины неустойчивого (инверсионного) распределения плотностей пород в земной коре и тектонические проявления этой неустойчивости. Первичной причиной инверсии плотностей пород, по Г. Вундерлиху, может быть осадконакопление, когда породы меньшей плотности перекрываются породами большей плотности; вторичной — тектонические деформации. Тектоническая инверсия плотностей, по его представлениям, может создаваться при тектонических деформациях вследствие вторичного перекрывания легких пластичных пород более тяжелыми. Инверсия плотности может возникать также при метаморфических и магматических процессах.

Тектонические проявления неустойчивости (соляные купола и другие складки нагнетания, интрузии и т. п.), несмотря на различные причины их образования, имеют близкие, в некоторой степени совпадающие между собой формы. Соляные поднятия, изученные относительно лучше, рассматриваются Г. Вундерлихом как природная модель

крупного масштаба, отражающая тектонические процессы в более глубоких зонах.

Рассмотрение исследования по моделированию формирования соляных диапиров и теоретическое (математическое) изучение развития неустойчивости в первой ее стадии касаются отдельных сторон этого процесса. Для дальнейшего исследования формирования соляных структур Прикаспийской впадины было проведено моделирование (Сычева-Михайлова 1969, 1970, 1972а, б).

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА В ОБСТАНОВКЕ ИНВЕРСИИ ПЛОТНОСТИ В МОДЕЛЯХ

Процесс перемещения горных пород в обстановке инверсии плотности, происходящий в земной коре и верхней мантии, является сложным. Он определяется целым рядом взаимно связанных между собой явлений, роль каждого из которых изучена в настоящее время недостаточно. В связи с этим полное теоретическое обоснование этого процесса и расчеты, касающиеся деталей его развития, пока еще невозможны. Моделирование проводилось с целью частично восполнить этот пробел, т. е. по возможности составить представление о механизме тектонических процессов, обусловленных инверсией плотности. Из тектонических структур, образующихся в условиях гравитационной неустойчивости, геологически наиболее изучены соляные структуры, применительно к развитию которых и проводилось моделирование.

В природных условиях на процесс перемещения в условиях инверсии плотности одновременно действует ряд факторов, выделить влияние каждого из которых не всегда возможно. Моделирование имеет в этом отношении те преимущества, что позволяет исследовать процесс по сериям, в каждой из которых изменяется только один фактор при сохранении остальных неизменными. В природных условиях развитие процесса перемещения из-за большей его длительности недоступно непосредственному наблюдению. На моделях его можно наблюдать в течение короткого времени.

Задачи моделирования

Задачи моделирования состояли в изучении: 1) общей картины перемещения в условиях неустойчивого расположения легкой соли под более тяжелыми надсолевыми породами, 2) стадий развития этого процесса, 3) факторов, которые определяют форму, размеры и распределение соляных поднятий и прогибов, 4) закономерностей скорости процесса перемещения. На твердых пластичных материалах дополнительно изучалось влияние на рост соляных куполов: а) перерывов в процессе их роста и последующего увеличения мощности тяжелого материала; б) разной прочности слоев тяжелого материала; в) двух горизонтов соли, разделенных межсолевыми породами.

Было проведено 308 опытов, из них 175 на вязких жидкостях и 133 на твердых пластичных материалах. Опыты проводились по сериям, в каждой из которых выявлялось влияние на процесс деформации одного определенного фактора (мощности, вязкости, разности плотности легкого и тяжелого слоя и др.) при неизменности других. Некоторые опыты одновременно относились к разным сериям. Влияние мощности наблюдали в 260 опытах, вязкости — в 156 и разности плотности слоев — в 11 опытах. Роль двух последних факторов изучали только на вязких жидкостях. В моделях из пластичных материалов определяли влияние на форму и распределение куполов последовательного увеличения мощности тяжелого слоя, сопровождавшегося возобновлением перемещения (14 опытов), и разной прочности слоев тяжелого материала (15 опы-

тов). В двух опытах характер перемещения изучался при наличии в разрезе двух горизонтов легкого материала.

В основной части опытов на двух вязких жидкостях перемещение происходило при неустойчивом равновесии системы самопроизвольно под действием силы тяжести и только на битуме и смеси канифоли с машинным маслом (в 11 опытах) вследствие большей вязкости этой смеси передвижение ускоряли подогревом модели снизу. В смеси, содержащей 70% канифоли, путем последовательного замораживания ее слоев и промазывания их жидкой каолиновой глиной создавалась тонкая слоистость, позволившая зафиксировать в тяжелой жидкости детали нарушений, образовавшиеся при перемещении вверх легкого битума.

Возможное влияние тектонических движений подсолевого ложа на процесс перемещения не рассматривалось. В трех-четырех опытах перемещение вязких жидкостей происходило на основе предварительно заданных в кровле легкого слоя неровностей.

Условия подобия

Основные качественные и количественные стороны процесса, наблюдавшиеся в опыте, можно распространять на природные явления лишь в том случае, если процесс в модели физически подобен природному. Для этого, как указывают В. В. Белоусов и М. В. Гзовский (1964), должны быть соблюдены следующие условия: 1) геометрическое подобие, 2) подобие сил и 3) подобие свойств материалов.

В модели и в природе рассматриваются деформации, возникающие вследствие действия силы тяжести в условиях расположения тяжелого материала над легким. Такое расположение является неустойчивым и приводит к перемещению тяжелого материала вниз, а легкого вверх. При этом перемещении в опытах возникают деформации определенной формы, аналогичные природным.

При подборе для опытов эквивалентных материалов был выполнен расчет их вязкости по формуле общего условия подобия $C_{\eta} = C_p \cdot C_l \times C_t \cdot C_g$. Эта формула, по М. В. Гзовскому (1963), пригодна для использования при моделировании процесса гравитационного всплытия соляных куполов в условиях отсутствия разрывов. В ней C_{η} — отношение вязкости веществ в модели и в природе, C_p — отношение разности их плотности, C_l — отношение размеров (высот) куполов, C_t — отношение времени их образования в модели и в природе и C_g — отношение величины центробежной силы в модели с использованием центрифуги и нормальной силы тяжести в природных условиях. Если моделирование проводится не на центрифуге, то $C_g=1$ и из уравнения выпадает.

В опытах без центрифуги при расчетах в соответствии с существующими данными о развитии соляных куполов и лабораторными возможностями приняты следующие величины. Природные условия: примерное время роста соляных куполов в Прикаспийской впадине на первом этапе (поздняя пермь — ранний триас) 25 млн. лет; высота куполов 4 км; разность плотности надсолевых толщ и соли 0,15 г/см³; вязкость соли и осадочных пород принята равной в среднем 10¹⁸—10²⁰ пуз. Условия эксперимента: продолжительность эксперимента 20 мин; высота куполов 10—20 см; разность плотности надсолевых пород и соли 0,4 г/см³.

В результате решения приведенного выше уравнения вязкость материалов, подобранных для опытов без центрифуги, была установлена примерно в 10³ пуз. Решение уравнения:

$$\frac{\eta}{10^{19}} = \frac{0,4}{0,1} \cdot \frac{15}{4 \cdot 10^5} \cdot \frac{12 \cdot 10^2}{75 \cdot 10^{13}} = \frac{6 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^{18}} ; \quad \eta = \frac{6 \cdot 10^3 \cdot 10^{19}}{25 \cdot 10^{18}} \approx 10^3 \text{ пуз.}$$

Близкой вязкостью (η) к рассчитанной цифре обладают вязкие жидкости: смесь битума с нигролом (от 10^3 до 10^5 — 10^6 пуз), патока (10^2 — 10^3 пуз), химически чистое жидкое стекло (10^2 пуз) и смесь ка-нифоли с машинным маслом (10^4 — 10^5 пуз), которые и были использованы в опытах как эквивалентные материалы. Вязкость их от полученной при расчете цифры несколько отклоняется в сторону уменьшения или увеличения. Это связано с отклонением значений входящих в уравнение величин от средних значений, принятых при расчете.

При расчете вязкости эквивалентных материалов в опытах с центрифугой для природных условий учитывались те же данные, что и в опытах без центрифуги. Для экспериментов были приняты следующие средние величины: продолжительность эксперимента 5 мин; высота купола 3 см; разность плотности надсолевых толщ и соли $1 \text{ г}/\text{см}^3$ и величина центробежной силы центрифуги 1000 g .

В результате решения приведенного уравнения вязкость материалов, подбираемых для моделирования процесса формирования соляных куполов в центрифуге, была определена больше 10^5 пуз. Решение уравнения:

$$\frac{\eta}{10^{19}} = \frac{1}{0,1} \cdot \frac{3}{4 \cdot 10^5} \cdot \frac{3 \cdot 10^2}{75 \cdot 10^{13}} \cdot \frac{1000}{1} = \frac{3 \cdot 10^6}{10^{20}};$$

$$\eta = \frac{3 \cdot 10^6 \cdot 10^{19}}{10^{20}} = 3 \cdot 10^5 \text{ пуз.}$$

После ряда попыток для опытов с центрифугой были отобраны: каучук СКТВ-1 (вязкость 10^5 — 10^6 пуз) и замазка (вязкость 10^7 — 10^9 пуз).

Таким образом, при моделировании соляных структур в нормальном поле силы тяжести Земли, в соответствии с теорией подобия, приходится употреблять вязкие жидкости. Это обстоятельство затрудняет изготовление и изучение моделей. Модель из вязких жидкостей приходится создавать в сосуде, поскольку под собственным весом они быстро растекаются. Невозможно и остановить эксперимент на какой-либо стадии, так как после его начала перемещение происходит до тех пор, пока весь легкий материал не окажется наверху, а тяжелый внизу. Преимущество использования вязких жидкостей состоит в том, что они могут быть прозрачными. Это дает возможность последовательно наблюдать весь ход процесса.

В экспериментах с использованием центрифуги сила тяжести заменяется центробежной силой, величина которой может в сотни и тысячи раз превышать нормальную силу тяжести Земли. Это позволяет без нарушений условий подобия применять более вязкие материалы, имеющие предел пластичности, т. е. являющиеся твердыми. Применение в опытах твердых пластичных материалов дает большие преимущества. Они позволяют изготавливать значительно более сложные — слоистые модели, останавливать эксперимент на любой стадии процесса и после эксперимента резать модель и сохранять ее в течение продолжительного времени.

Свойства эквивалентных материалов

При изучении свойств эквивалентных материалов наиболее важным является исследование их вязкости и зависимости ее от напряжения. По зависимости вязкости от напряжения все вещества подразделяются на несколько групп. Жидкости, вязкость которых не зависит от напряжения, называются ньютоновскими жидкостями (рис. 15, а).

Жидкости, вязкость которых падает с увеличением напряжения, называются аномально-вязкими жидкостями (рис. 15, б). Вещества, вязкость которых до определенного увеличения напряжения имеет чрезвычайно большое значение, а после перехода через это предельное значение напряжения (предельное напряжение сдвига) резко на много порядков падает, называются пластичными (или условно-пластичными) телами (рис. 15, в).

Вязкость большинства эквивалентных материалов, используемых в опытах (табл. 2), исследовалась нами на пластовискозиметре конструкции В. П. Павлова и Г. В. Виноградова (1957)¹. Прибор предназначен для определения вязкости как вязких жидкостей, так и пластичных материалов. Для вязких жидкостей (патоки, жидкого стекла, этилцеллюлозы, смеси битума с нигролом) исследование вязкости одновременно проводилось и на ротационном вискозиметре РВ-8 системы проф. М. П. Воларовича. В ограниченном количестве случаев (для смеси битума с нигролом при содержании в смеси битума 25, 35 и 50% и двух сортов патоки) определение вязкости выполнялось только на вискозиметре РВ-8 М. П. Воларовича. Вязкость пластичных материалов (каучука и замазки) исследовалась также на прессе, сконструированном в Институте физики Земли АН СССР М. В. Гзовским, Д. Н. Осокиной и М. В. Забелиным. Была сделана попытка произвести определение вязкости каучука и замазки в Институте нефтехимического синтеза АН СССР им. А. В. Топчиева на вискозиметрической бомбе методом продавливания через капилляр под высоким давлением.

Ротационный вискозиметр РВ-8 М. П. Воларовича позволяет производить измерение вязкости вещества в пределах от 5 до 10^7 пуз.

Вязкость η в пуазах в этом случае вычислялась по формуле: $\eta = K \frac{P - P_0}{N}$,

где P — груз, врачающий цилиндр вискозиметра, является суммой двух разных грузов, подвешенных на обеих нитях прибора; P_0 — собственное трение подшипников, составляющее от 1 до 2,5 г; N — число оборотов цилиндра; K — константа, зависящая от постоянных характеристик прибора и высоты испытуемой жидкости, залитой между его цилиндрами.

В связи с тем, что характеристики прибора — радиус цилиндра внешнего 1,915 см, радиус цилиндра внутреннего 1,605 см и радиус шкива 1,475 см — являются постоянными величинами, константа K меняется только в зависимости от высоты испытуемой жидкости (от 3 до 8 см). Практически константа K для различных значений уровня жидкости определялась из графика зависимости K от h (рис. 16). N определяется по формуле: $N = \frac{n}{t}$, где n — количество оборотов, а t — время, в течение которого вращающаяся система вискозиметра делает n оборотов. Трение подшипников P_0 величина по сравнению с общим грузом P незначительная и не учитывалась.

При измерении вязкости на вискозиметре РВ-8 М. П. Воларовича исследуемую жидкость заливали в цилиндр и на нить прибора последовательно подвешивали четыре различных груза возрастающего веса.

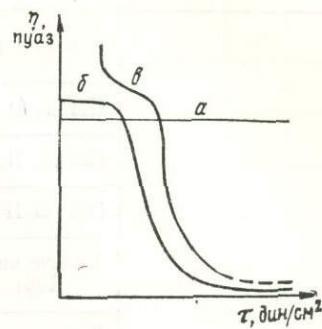


Рис. 15. Зависимость вязкости (η) от напряжения сдвига (τ). По Н. В. Михайловой и П. А. Ребиндеру (1955)

а — для ньютоновских жидкостей; *б* — для аномально-вязких жидкостей; *в* — для пластичных тел (или условно-пластичных)

¹ Прибор описан Д. Н. Осокиной (1963).

Таблица 2

их основные свойства

Пластовискозиметр В. П. Павлова		Ротационный вискозиметр РВ-8 М. П. Боларовича		Пресс Ин-та физики Земли (М. В. Гзовский, Д. Н. Осокина, М. В. Забелин)	
Вязкость, пуз	Напряжение, г/см ²	Вязкость, пуз	Напряжение, г/см ²	Вязкость, пуз	Напряжение, г/см ²
1,4·10 ³ —3,2·10 ³	0,1—2	1,4·10 ³	—	—	—
4,2·10 ² —1,4·10 ³	0,1—2	—	—	—	—
—	—	1,2·10 ²	—	—	—
—	—	5,2·10 ²	—	—	—
1,5·10 ² —8·10 ²	0,05—0,6	3,3·10 ² (3,9·10 ²)	—	—	—
—	—	2,3·10 ²	—	—	—
—	—	3,5·10 ² (4,4·10 ²)	—	—	—
7,5·10 ² —1,8·10 ³	0,08—4	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	2,5·10 ³	—	—	—
—	—	—	—	—	—
8,1·10 ⁴ —3,9·10 ⁵	—	—	—	—	—
2,4·10 ⁵ —1,2·10 ⁶	0,06—22	—	—	—	—
—	—	10 ⁵ —10 ⁶	—	—	—
3,1·10 ³ —5,5·10 ³ или 5,8·10 ² —1,9·10 ³	0,1—17 0,06—6	9,8·10 ²	—	—	—
—	—	—	—	—	—
5,8·10 ⁴ —5,4·10 ⁵	2—60	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
4,8·10 ⁵ —9,3·10 ⁵	2—73	—	—	—	—
2,6·10 ⁵ —1,2·10 ⁶	5—52	—	—	—	—
3,1·10 ⁵ —1,3·10 ⁶	5—52	—	1,2·10 ⁵ —2,7·10 ⁶	0,45—3,9	—
		—	3,4·10 ⁷ —7,9·10 ⁹ (?)	0,3—0,8	
		—	1,3·10 ⁹ —1,2·10 ¹⁰ (?)	0,53—3,2	

Эквивалентные материалы и

Характер вещества	Название эквивалентных материалов	Плотность, г/см ³
При расстече рифутой для опытей без нее среди зерен поля 3 см личина центров В разном лов, под прессом курую и притра новой	Патока I (в опытах с 1 по 131)	1,42
	Патока II (в опытах с 132 по 139 и с 157 по 159)	1,42
	Патока II разведенная (в опытах 140—156)	1,42
	Патока II после выпаривания	1,42
	Химически чистое жидкое стекло (в опытах 140—156)	1,6
Аномально-вязкие жидкости	Битум с нигром 25%-ный	0,97—1,004
	То же 35%-ный	0,97—1,004
	» 40%-ный	0,97—1,004
	» 45%-ный	0,97—1,004
	» 50%-ный	0,97—1,004
	» 52%-ный	0,97—1,004
	» 53%-ный	0,97—1,004
	» 54%-ный	0,97—1,004
	» 55%-ный	0,97—1,004
	Битум 50%-ный с примесью глины	1,15
	Этилцеллюлоза	1,08
	Смесь канифоли с машинным маслом 50%-ная	—
	Смесь канифоли с машинным маслом 65%-ная	1,002
	То же 70%-ная	1,03
	То же, 70%-ная с примесью глины	1,12
Условно-пластичное тело (или аномально-вязкая жидкость)	Каучук СКТВ-1 белый	0,97
	То же, красный	1,0
Пластичное тело	Замазка	2,03

Для каждого груза P определяли N — число оборотов цилиндра в минуту. Вязкость вычисляли по вышеприведенной формуле для каждой пары значений N и P .

По результатам измерений строили графики зависимости числа оборотов цилиндра вискозиметра в секунду N от величины P . Для примера приведены графики для жидкого стекла (рис. 17) и для

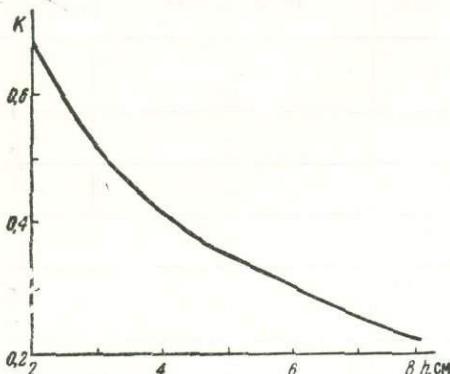


Рис. 16. График зависимости константы K прибора от высоты h уровня испытываемой жидкости. По М. П. Воларовичу

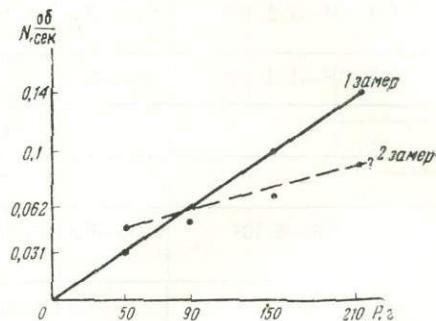


Рис. 17. График зависимости числа оборотов цилиндра вискозиметра в секунду (N) от величины груза (P) для жидкого стекла (при комнатной температуре)

40%-ного битума (рис. 18). Графики прямолинейные, что указывает на независимость вязкости от напряжения в заданном интервале изменения последнего. Разброс точек на графике дает представление о точности наблюдений.

Для определения вязкости на пластовискозиметре В. П. Павлова (1956) применяли метод постоянных напряжений сдвига: к ротору прикладывали различные постоянные крутящие моменты P и замеряли скорость его вращения φ . При этом учитывали потери на трение холостого хода. По величинам P и φ находили значение величин τ (напряжение сдвига) и D (скорость деформации):

$$\tau = P \cdot C_\tau, \text{ где } C_\tau = 0,0086469;$$

$$D = C_D \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}, \text{ где } C_D = 0,0080108.$$

Величины C_τ и C_D для прибора постоянные (Осокина, 1963). Величину вязкости η определяли по формуле $\eta = \frac{\tau}{D}$, где вязкость является функцией напряжения. В качестве примера приведен расчет вязкости 55%-ного битума (табл. 3). По полученным данным построен график (рис. 19, а) зависимости вязкости 55%-ного битума от напряжения, показывающий, что битум ведет себя как жидкость с заметно выраженной аномалией вязкости. При изменении напряжения от $0,6 \cdot 10^2$ до $22 \cdot 10^3$ дин/см² вязкость битума падает от $1,2 \cdot 10^6$ до $2,4 \times 10^5$ паз., т. е. в 5 раз.

Графики зависимости вязкости от напряжения по результатам замеров на пластовискозиметре В. П. Павлова для жидкого стекла и для двух сортов патоки приведены на рис. 19, б, в. Для жидкого стекла (рис. 19, б) при изменении напряжения от 50 до 600 дин/см² происходит падение вязкости от $8 \cdot 10^2$ до $1,5 \cdot 10^2$ паз., т. е. в 5 раз. Для двух сортов патоки (рис. 19, в) при увеличении напряжения от 100 до

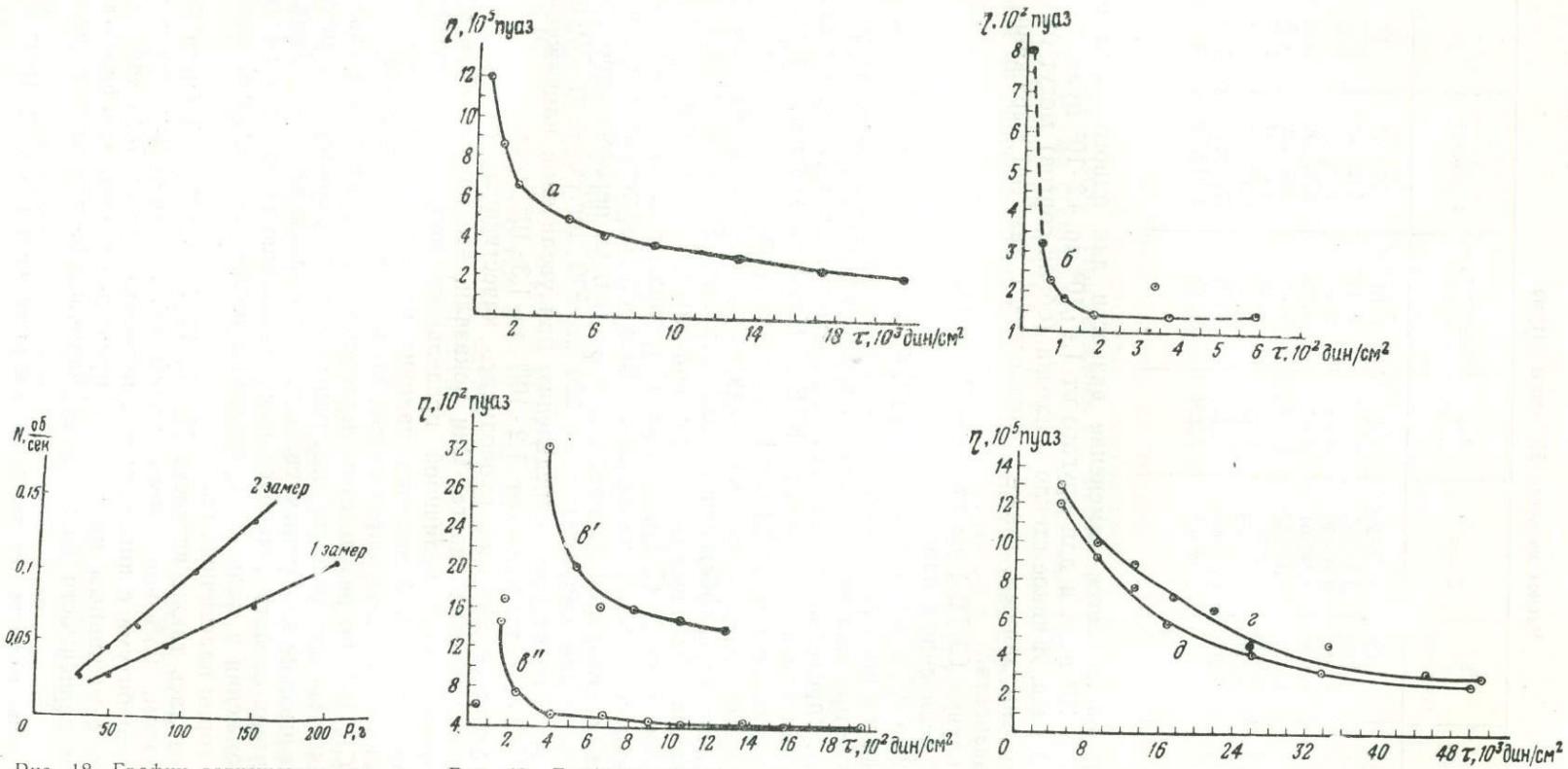


Рис. 18. График зависимости числа оборотов цилиндра вискозиметра в секунду (N) от величины груза (P) для 40%-ного битума (при комнатной температуре)

Рис. 19. Графики зависимости вязкости от напряжения сдвига (определение выполнено на пластовискосизметре В. П. Павлова)
 a — для 55%-ного битума; b — для жидкого стекла; c — для двух сортов патоки (c' — в опытах с 1—131 и c'' — в опытах 132—156); d — для красного каучука марки СКТВ-1; ∂ — для белого каучука марки СКТВ-1

Таблица 3

Расчет вязкости 55 %-ного битума

P , г	τ , г/см ²	$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$, град/мин	D сек ⁻¹	$\tau_{хол}$ г/см ²	$\tau_{ист} = \tau - \tau_{хол}$, г/см ²	τ , дин/см ²	$\eta, 10^5$ пуаз
75	0,650	0,062	0,000496	0,4	0,61	593,41	12
175	1,513	0,204	0,00163	0,065	1,448	1420,488	8,7
275	2,38	0,425	0,00340	0,08	2,3	2256,3	6,6
575	4,97	1,200	0,00961	0,11	4,86	4767,66	4,9
775	6,70	1,925	0,01542	0,14	6,56	6435,36	4,1
1075	9,29	3,000	0,02403	0,177	9,11	8936,91	3,7
1575	13,62	5,100	0,04085	0,21	13,41	13155,21	3,2
2075	17,95	8,200	0,06569	0,25	17,70	17363,7	2,6
2575	22,25	11,07	0,08868	0,294	21,96	21542,76	2,4

2000 дин/см² наблюдается изменение вязкости для одного сорта от $3,2 \cdot 10^3$ до $1,4 \cdot 10^3$ пуаз и для другого от $1,4 \cdot 10^3$ до $4,2 \cdot 10^2$ пуаз, т. е. примерно в 3 раза. Жидкое стекло и патока (обоих сортов) могут быть отнесены, по этим данным, также к жидкостям с заметно выраженной аномалией вязкости.

Белый каучук СКТВ-1 на приборе В. П. Павлова дает понижение вязкости с увеличением напряжения от $5 \cdot 10^2$ до $52 \cdot 10^3$ дин/см², от $1,2 \cdot 10^6$ до $2,6 \cdot 10^5$ пуаз, а красный каучук от $1,3 \cdot 10^3$ до $3,1 \cdot 10^5$ пуаз, т. е. примерно в 4 раза (рис. 19, $г$, $д$).

На прессе при сжатии образцов по методике, описанной Д. Н. Осокиной (1963), определялась вязкость для свежеприготовленной замазки и повторно для красного каучука СКТВ-1. Вязкость красного каучука СКТВ-1 при напряжении от 0,45 до 4 г/см² была определена в $2,7 \cdot 10^6$ — $1,2 \cdot 10^5$ пауз. При расчете вязкости каучука учитывалась его деформация под действием собственного веса образца. Расчет поправки на эту деформацию был выполнен при консультации доктора физико-математических наук А. С. Григорьева. Исследования вязкости каучука на прессе являются более надежными. Вязкость свежеприготовленной замазки при исследовании на прессе изменяется: по первому определению при увеличении напряжения от 300 до 800 дин/см² — от $7,9 \cdot 10^9$ до $3,4 \cdot 10^7$ пуаз; по второму определению при увеличении напряжения от $5 \cdot 10^2$ до $32 \cdot 10^2$ дин/см² — от $1,2 \cdot 10^{10}$ до $1,3 \cdot 10^9$ пуаз.

Для каучука и замазки проводились качественные определения предельного напряжения сдвига. Они показали, что каучук обладает, видимо, незначительной величиной предельного напряжения сдвига; для свежеприготовленной замазки наличие предельного напряжения сдвига фиксируется более определенно, но величина его невелика.

Каучук СКТВ-1, по результатам исследований, является аномально-вязкой жидкостью или условно-пластичным телом, проявляющим резко выраженные высокие эластичные свойства и аномалию вязкости. Замазка по характеру свойств (значительному изменению вязкости с увеличением напряжения и наличию предельного напряжения сдвига) относится к категории пластичных тел.

Исследовалась также вязкость 25, 35, 40, 50 и 54 %-ной смеси битума с нигролом, 65 %-ной смеси канифоли с машинным маслом, 50 %-ной смеси битума с нигролом и с примесью глины, 70 %-ной смеси канифоли с машинным маслом и с примесью глины, этилцеллюлозы¹. Кривые зависимости вязкости от напряжения для этих веществ

¹ Исследование вязкости для этилцеллюлозы ранее проводилось Д. Н. Осокиной (1963).

имеют такой же характер, что и для патоки, 55%-ного битума и жидкого стекла, т. е. эти вещества также относятся к категории аномально-вязких жидкостей.

Таким образом, изучение свойств эквивалентных материалов показало, что патока, жидкое стекло, этилцеллюлоза, различные смеси канифоли с машинным маслом и битумом с нигролом могут быть отнесены к аномально-вязким жидкостям (см. табл. 2). Замазка отличается от них по своим свойствам и является пластичным телом. Каучук с его высокоэластичными свойствами занимает промежуточное положение между аномально-вязкими жидкостями и пластичными телами, однако определение его свойств требует еще специальных исследований.

Исходные данные, принятые для основных серий опытов

В большей части опытов на вязких жидкостях (опыты 1—139; 157—159) легкой жидкостью, имитирующей соль, служила смесь битума с нигролом¹. Применялись 25; 35; 40; 45; 50; 52; 53; 54 и 55%-ная смеси битума с нигролом². Значения плотности и вязкости для каждой смеси приведены в табл. 2. В качестве тяжелой жидкости, эквивалентной надсолевым толщам, использовалась патока с плотностью 1,42 г/см³ и вязкостью 1,4·10³ пауз — В³ или 1,4·10³—3,2·10³ пауз — П⁴ (в опытах 1—131) и 4,2·10²—1,4·10³ пауз — П (в опытах 132—139 и 157—159). При этом легкая жидкость имела большую вязкость, чем тяжелая. В одном опыте вязкости жидкостей были равны. В связи с большой разностью плотности эквивалентных материалов в опыте, по сравнению с природными условиями, для замедления процесса вязкость битума в ряде опытов по сравнению с рассчитанной была увеличена до 10⁵—10⁶ пауз.

В меньшем количестве опытов (140—156) легкой жидкостью служила патока с плотностью 1,42 г/см³ и вязкостью 1,2·10² пауз — В, а тяжелой — химически чистое жидкое стекло с плотностью 1,6 г/см³ и вязкостью 1,5·10²—8·10² пауз — П или 3,3·10² (3,9·10²) пауз — В. Большую вязкость здесь имела тяжелая жидкость.

В опытах на твердых пластичных материалах с использованием центрифуги эквивалентом соли обычно был красный каучук СКТВ-1⁵ с плотностью 1 г/см³ и вязкостью 3,1·10⁵—1,3·10⁶ пауз — П или 1,2·10⁵—2,7·10⁶ пауз — ПС⁶ и реже белый каучук СКТВ-1 с плотностью 0,97 г/см³ и вязкостью 2,6·10⁵—1,2·10⁶ пауз — П, а эквивалентом пород, покрывающих соль, служила замазка с плотностью 2,03 г/см³ и вязкостью 3,4·10⁷—7,9·10⁹ пауз — ПС.

Выполнение опытов

Опыты с битумом и патокой проводились следующим образом. Смесь битума с нигролом заливали в стеклянный сосуд с квадратным сечением 20×20 см и высотой 20 см. Для удаления пузырьков воздуха, которые попадали в смесь при заливке, она выдерживалась в течение суток. После этого на битум по стенкам сосуда осторожно наливали

¹ В дальнейшем для краткости эта смесь будет называться просто битум.

² Указываются процентные содержания в смеси битума.

³ Здесь и далее В — определение вязкости выполнено на приборе РВ-8 системы М. П. Боларовича.

⁴ Здесь и далее П — определение вязкости выполнено на приборе В. П. Павлова.

⁵ Каучук марки СКТВ-1 — синтетический каучук термостойкий, винилсиликсановый с высоким содержанием винильных звеньев.

⁶ Здесь и далее ПС — определение вязкости выполнено на прессе (М. В. Гзовский и др.) методом сжатия образцов.

патоку и опыт начинался. Патока считалась пригодной для опыта, если она была достаточно прозрачной. Две различные по окраске несмешивающиеся жидкости: черный битум, разведенный нигролом, и бесцветная прозрачная патока дают четкое изображение границы неустойчивости между ними и изменение ее формы при движении этих жидкостей.

Наблюдения велись по четырем боковым стенкам сосуда, обозначенным буквами А, Б, В, Г и сверху, что в совокупности дало возможность судить о характере движения жидкостей во всем объеме сосуда. В опытах с патокой и жидким стеклом при небольшом различии их в окраске изменение формы границы между ними оттенялось мелким волосом, помещенным в жидкое стекло. Последнее использовалось только в свежеприготовленном виде, так как является коллоидом и быстро стареет, превращаясь в хрящевидный студень. Опыты с жидким стеклом проводились в сосуде меньших размеров.

На миллиметровой бумаге в масштабе 1 : 1 фиксировали расположение и размеры куполов, достигших поверхности патоки, а при помощи секундомера — время их роста. Основным документом опытов явились фотографии, отснятые через короткие отрезки времени. Опыт фотографировали с боковых стенок сосуда, а при достижении куполом поверхности тяжелой жидкости — сверху, иногда одновременно с разных сторон сосуда двумя фотоаппаратами. Наличие на кадрах фотографий масштабной линейки и записи времени съемки каждого кадра позволяют судить об изменении формы и размеров куполов и о скорости их роста.

Приготовление модели из каучука и замазки сводилось к следующему. Небольшие кусочки каучука раскладывались заранее на стекло (на кальку). Под собственным весом каучук с течением времени растекался по стеклу, образуя слои толщиной 2, 4 и 6 мм. Замазка (смесь порошка мела и олифы) использовалась свежеприготовленная, при этом она тщательно разминалась в руках для увеличения пластичности. Для получения в моделях слоистости белый каучук и замазку окрашивали в различные цвета. Часть белого каучука была окрашена редоксайдом в красный цвет, а замазка окрашивалась в разные цвета жировыми красками.

Для создания модели использовали металлическую форму диаметром 72 мм, равным диаметру стакана центрифуги, с острыми режущими краями и с поршнем на дне. Навески окрашенной и неокрашенной замазки помещали на дно формы последовательно, и каждую навеску при помощи пестика распределяли ровным, необходимой толщины слоем. Затем острым краем формы из каучука, растекшегося по стеклу, вырезали слой необходимой по условиям опыта толщины. Этот слой (или слои белого и красного каучука) накладывали сверху на слоистую замазку. Высота модели определялась толщиной слоев каучука и замазки. После этого при помощи поршня модель выдавливала из формы в стакан центрифуги, стенки которого для удобства последующего извлечения образца были выложены калькой. При этом в стакане центрифуги внизу располагался легкий каучук, а над ним тяжелая замазка.

Затем стакан с моделью помещали в центрифугу. В связи с отжиманием с границы неустойчивости тяжелой замазки по направлению действия центробежной силы, а легкого каучука в противоположном направлении происходило их перемещение и деформация слоев модели. Время вращения модели в центрифуге изменялось от десятков секунд до десятков минут при величине центробежной силы на дне стакана в среднем 1000 g. Конкретные их значения подбирались для каждой серии опытов и определялись величиной деформации, которую необходимо было создать в модели. Полученные деформации были изучены с поверхности и в разрезах. Разрезы через модель делались либо в

вертикальном направлении (до 8—10 разрезов на небольших расстояниях друг от друга), либо в горизонтальном (2—3 разреза на разных высотных уровнях). В некоторых случаях, чтобы непосредственно наблюдать характер деформации поверхности легкого каучука, замазку в модели снимали.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ОБСТАНОВКЕ ИНВЕРСИИ ПЛОТНОСТИ НА МОДЕЛЯХ ИЗ ДВУХ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ И ИЗ ТВЕРДЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основные закономерности процесса перемещения в обстановке инверсии плотности, выявленные в опытах на двух вязких жидкостях и на твердых пластичных слоистых материалах, проявляются в общих чертах одинаково. Различие заключается в возможностях наблюдения над ходом процесса и в детальности его изучения. На вязких жидкостях перемещение их в нормальном поле силы тяжести от начала до конца (до полной перемены жидкостей местами) наблюдается в одной модели и непосредственно по всему ее объему. На твердых материалах в каждой модели фиксируется только определенный момент перемещения, обусловленный длительностью приложения центробежной силы. Представить весь ход процесса можно лишь при изучении срезов ряда однотипных моделей, наблюдаемое в них увеличивающееся перемещение есть результат более продолжительного вращения модели в центрифуге. Наличие слоистости в моделях из твердых материалов позволяет отмечать в их срезах детали процесса перемещения.

Выявленные закономерности касаются: 1) общего характера перемещения материала, 2) стадий развития процесса, 3) основных типов структур, образующихся в этих условиях, 4) некоторых количественных изменений размеров ячеек, куполов и расстояний между ними, 5) скорости роста куполов и изменения их формы в процессе роста и др.

Общий характер перемещения. Во всех сериях опытов на вязких жидкостях (битуме и патоке, патоке и жидким стекле, битуме и смеси канифоли с машинным маслом) и на твердых пластичных материалах (каучуке и замазке) общим в перемещении было то, что движение легкого и тяжелого материала происходило отдельными ячейками. Более наглядно эти ячейки выражены в пластичных материалах. Так, Так, в модели 88, после вращения ее в центрифуге в течение 2 мин при 300 g, в рельфе каучука (при снятии замазки) наблюдался ряд ваннообразных вдавленностей, которые образовывались вследствие опускания замазки внутри ячеек движения (рис. 20).

Замазка, опускаясь, выдавливает каучук к периферии ячеек, где он, поднимаясь, создает кольцевые массивы, состоящие из куполов разной высоты, соединенных перемычками. Одни купола этих массивов прорывают замазку и, растекаясь по ее поверхности, образуют купола грибообразного вида, напоминающие соляные купола прорванного типа, другие останавливаются на некотором расстоянии от поверхности замазки и соответствуют соляным куполам скрытопрорванного типа. Прорванный купол, расположенный в середине модели 88 на пересечении кольцевых массивов, более крупный, основание его имеет звездчатую форму. Легкий каучук, поднимающийся на периферии ячеек в виде кольцевых массивов, в горизонтальном срезе моделей образует кольца, а в вертикальном — призматические ячейки.

В модели 106 после вращения ее в центрифуге при 300 g в течение 13 мин в вертикальном разрезе обособились две ячейки (рис. 21). Рассмотрим характер перемещения замазки и каучука в пределах одной из них. Слева между двумя куполами видно опускание замазки с образо-

ванием на ее поверхности впадины. При опускании замазки в нижней части отжимается в стороны, что приводит к увеличению мощности ее слоев в сторону оснований куполов. Это способствует выжиманию каучука наверх и постепенно приводит к уменьшению поперечных размеров



Рис. 20. Кольцевое расположение куполов вокруг ваннообразных вдавленностей в рельефе поверхности каучука. (Модель 88 со снятой замазкой)

1 — крупный прорванный купол звездчатой формы (купол-гигант), главный; 2 — купол прорванного типа, сопутствующий; 3 — купола скрыто-прорванного типа, сопутствующие; 4 — перемычки, соединяющие купола прорванного и скрыто-прорванного типа в кольцевые массивы; 5 — мульды оседания в сводовой части прорванных куполов

Исходные данные: внизу — легкий каучук 8 мм, вверху — замазка 16 мм, время вращения модели в центрифуге 2 мин при 300 g

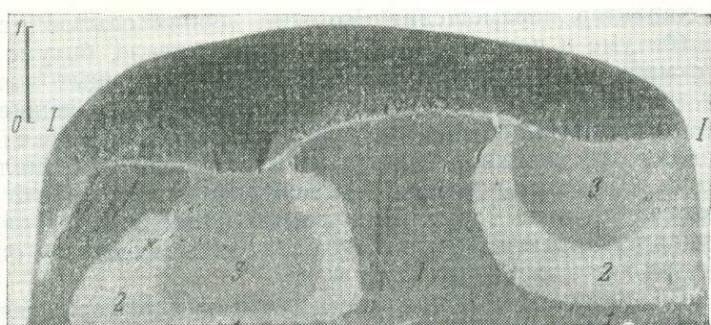


Рис. 21. Две самостоятельные ячейки аддективного перемещения легкого каучука наверх, а тяжелой двухслойной замазки вниз. (Вертикальный разрез модели 106)

1 — каучук; 2 — светлая замазка; 3 — окрашенная замазка.

Исходные данные: внизу — каучук 6—7 мм, вверху — двухслойная замазка 16 мм, время вращения модели 13 мин при 300 g

куполов внизу. Поднявшийся каучук образует на поверхности модели поднятие, которое, растекаясь на поверхности замазки, отжимает вниз новые ее порции. При этом головная часть поднятия из каучука принимает грибообразную форму.

Таким образом, движение замазки в пределах ячейки вниз вызывает поднятие каучука, который, поднимаясь, замыкает ячейку и способствует перемещению новых порций замазки вниз и т. д. В каждой из

ячеек движение происходит самостоятельно, независимо от движения в соседних ячейках. Скорости перемещения в центре ячейки и по ее краям максимальны, а в промежутках между этими встречными потоками они падают до минимума.

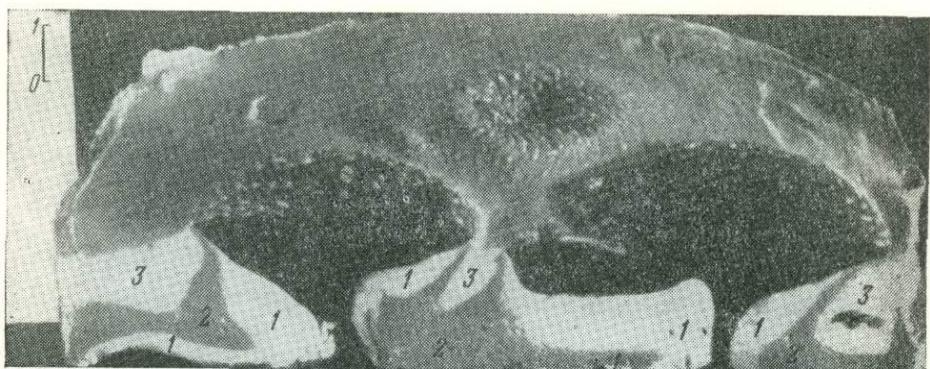


Рис. 22. Ячейки аддективного движения. (Вертикальный разрез модели 52)
Чаучик — черный тон; трехслойная замазка: 1 — нижний слой, белый тон, 2 — средний слой, серый тон, 3 — верхний слой, белый тон
Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — трехслойная замазка 16 мм, время вращения модели 8 мин при 300 g

В вертикальном разрезе модели 52 можно видеть более значительное перемещение материала в пределах трех неполных ячеек (рис. 22). Слои замазки (три слоя) разорваны поднимающимся каучуком на отдельные изолированные участки, имеющие вид крупных капель. Замазка слагает центральную часть ячейки, а каучук располагается на ее

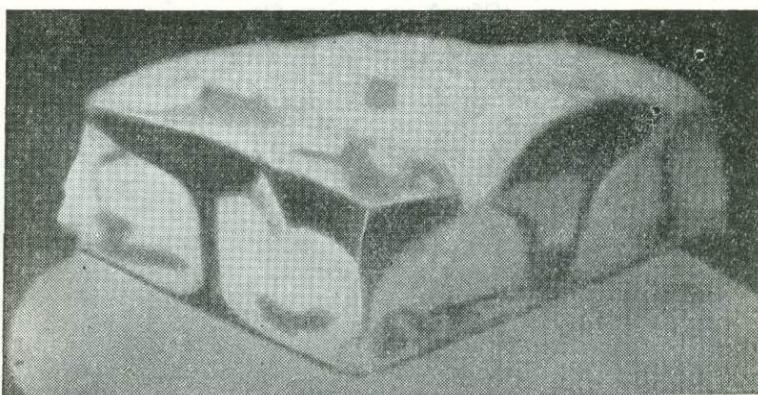


Рис. 23. Ячейка аддективного движения. (Вертикальный разрез модели 4 в двух сечениях)
Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — 3-х слойная замазка 15 мм, время вращения модели 1 мин при 1000 g

периферии и имеет вид поднятий, которые у основания пережаты, а в головной части расширены в виде шляпки гриба. Каждый такой купол является общим для двух соседних ячеек. В модели 4 (рис. 23) характер перемещения каучука и замазки наблюдается в двух вертикальных сечениях и аналогичен рассмотренному выше.

Поднимающийся на периферии ячеек каучук в горизонтальном срезе образует кольца или дуги. На поверхности модели 61, после вращения ее в центрифуге в течение 50 сек при 1000 g, образовалось шесть куполов грибообразной формы (рис. 24). Примерно на половине высоты

ты модели был сделан горизонтальный срез, на котором наблюдается кольцевое расположение указанных куполов (рис. 25 и 26). Основания трех из них соединены перемычками и образуют валообразное поднятие, имеющее в плане дугообразную форму. Три других купола с боко-

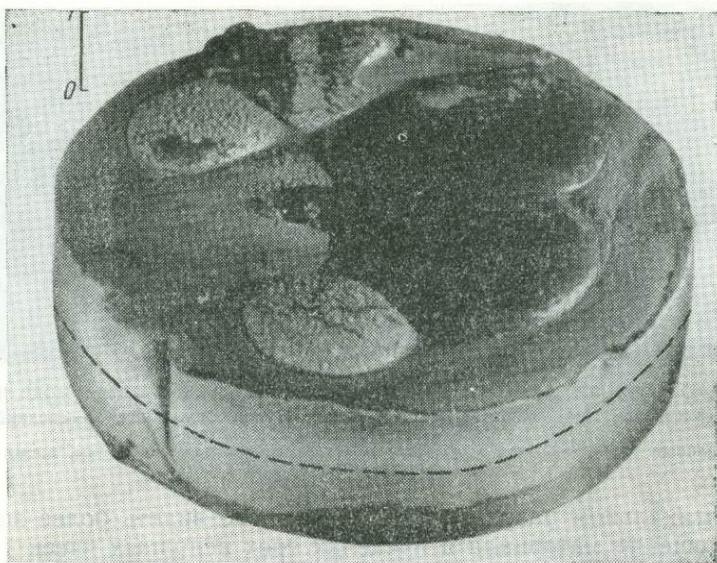


Рис. 24. Шесть куполов из каучука грибовидной формы, прорвавшие поверхность замазки. Пунктиром показано положение горизонтального среза модели, изображенного на рис. 25 и 26.
(Общий вид модели 61)

Исходные данные: внизу—каучук 4 мм, вверху—замазка 16 мм, время вращения модели 50 сек при 1000 g



Рис. 25. Расположение куполов (темный тон) в горизонтальном срезе модели 61

выми выступами имеют вид трехконечных звездочек и расположены на пересечении смежных кольцевых массивов. Продолжением этих куполов являются погруженные перемычки, высота поднятия которых не доходит до поверхности среза (см. рис. 26). Кольцевое расположение под-

нимаящегося каучука на периферии вдавленностей более отчетливо наблюдается в моделях со снятой замазкой (рис. 27 и 28).

В опытах на вязких жидкостях наблюдается аналогичный характер перемещения. Так, в опытах на битуме и патоке (рис. 29—33) вид-

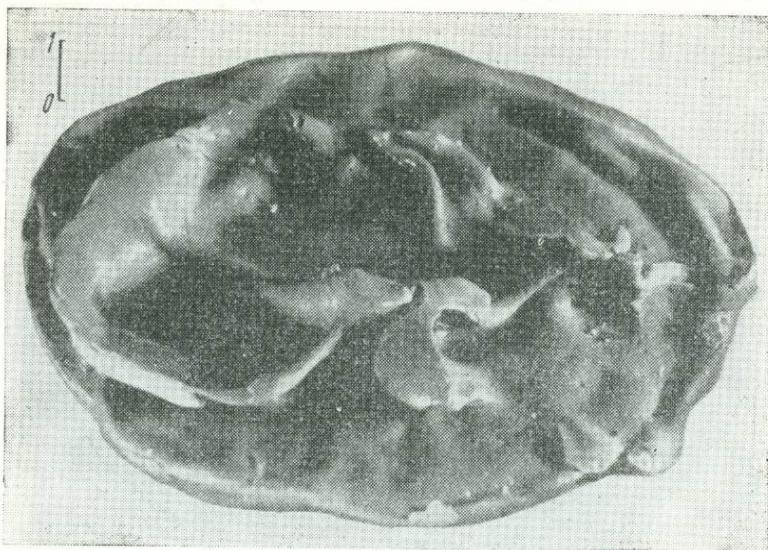


Рис. 26. Кольцевое расположение куполов вокруг ваннообразных вдавленностей на нижней половине модели 61 после снятия замазки

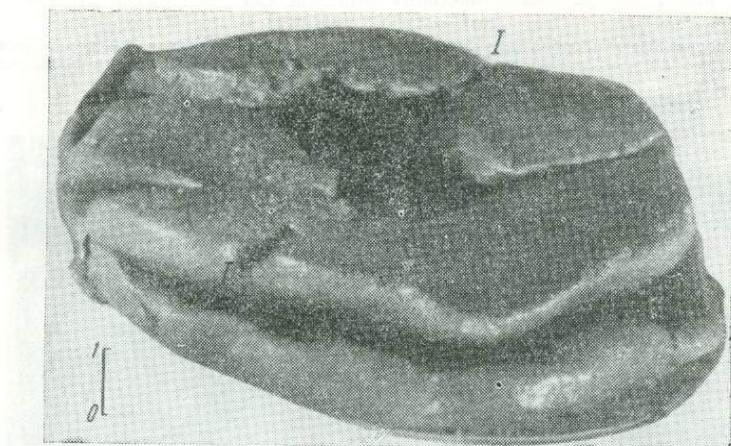


Рис. 27. Сплошной кольцевой массив. (Модель 114 со снятой замазкой; I—I — линия разреза)

Исходные данные: внизу — каучук 8 мм, вверху — замазка 12 мм, время вращения модели 2 мин при 300 г

но, что поднимающийся легкий битум разрывает слой патоки на изолированные участки, имеющие по форме вид крупных капель. Эти разорванные части слоя патоки со всех сторон окружены битумом: внизу — остатки слоя битума, по бокам — колонны поднявшегося битума, вверху — битум, растекшийся по поверхности патоки. Таким образом, перемещение битума и патоки также происходит в пределах изолированных ячеек.

Рассмотренные ячейки движения в опытах аналогичны по форме конвективным ячейкам Бенарда, возникающим при тепловой стационарной конвекции (или при неустойчивости Рэлея — Тейлора). Перемещение одной жидкости при подогреве снизу происходит непрерывно, при этом каждая ее частица движется по круговой траектории. В двух экви-

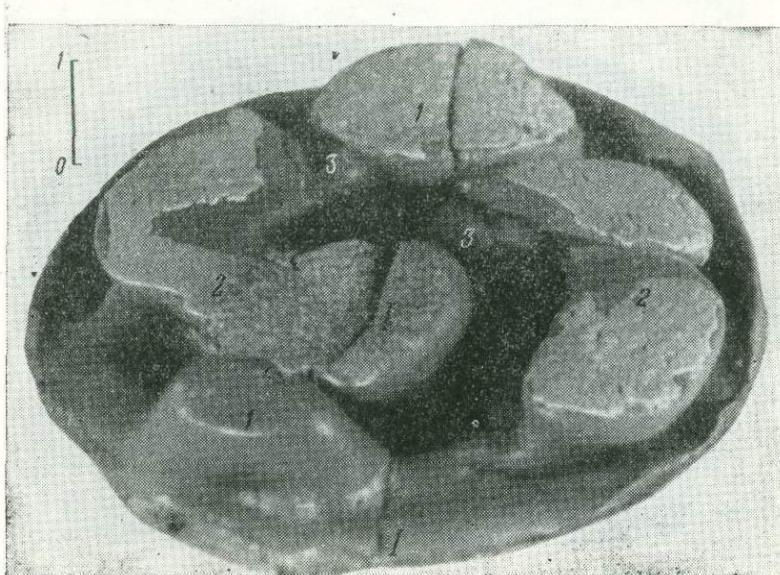


Рис. 28. Два кольцевых массива (слева почти сплошной, справа дугообразный), внутри них — впадины. (Модель 116 со снятой замазкой, 1—1 — линия разреза)

1 — прорванные грибообразные купола, 2 — валообразные поднятия, 3 — перемычки.
Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — замазка 16 мм, время вращения модели 2 мин при 300 g

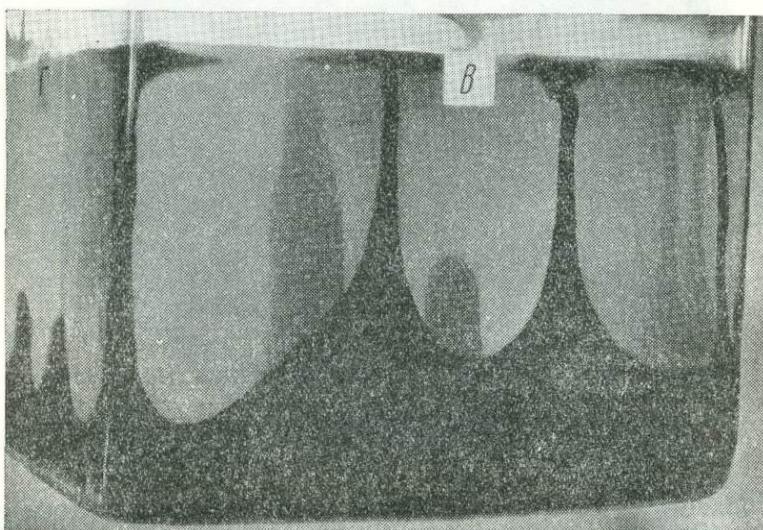


Рис. 29. Много мелких ячеек адvectionного движения в третьей стадии перемещения. На периферии ячеек расположены скрыто-прорванные и прорванные купола из битума; в центре их — впадины, выполненные патокой. (Опыт 36, кадр 22; вид со стороны В и Г).

Исходные данные: внизу — 55%-ный битум 1 см; вверху — патока 12 см

валентных материалах с резкой границей раздела и разной плотностью движение не является круговым. Легкий материал (битум или каучук) поднимается вверх и там остается, а тяжелый (патока или замазка), опускаясь, замыкает ячейку внизу. Тип конвективного движения двух

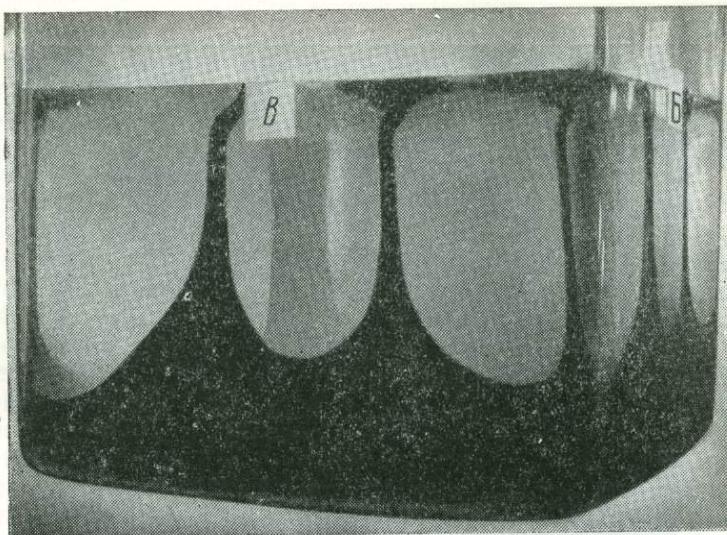


Рис. 30. Много мелких ячеек адвективного движения в третьей стадии перемещения. (Опыт 36, кадр 34, вид, со стороны В и Б)

Исходные данные см. рис. 29

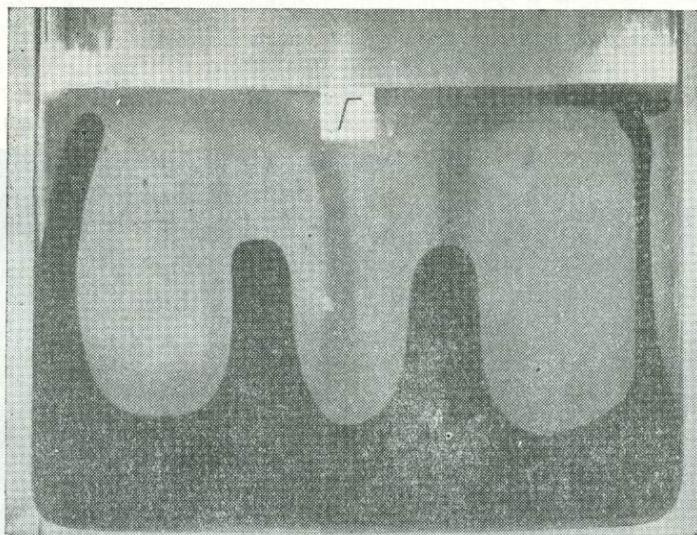


Рис. 31. Прорванные и скрытопрорванные купола из битума, соединенные перемычками на периферии ячеек адвективного движения. (Опыт 36, кадр 26, вид со стороны Г)

Исходные данные см. рис. 29

материалов разной плотности может быть охарактеризован как ограниченное конвективное движение, или адвекция. Движение в данном случае заканчивается, как только легкая жидкость поднимется наверх и инверсия плотности исчезнет.

Стадии развития процесса перемещения. В процессе перемещения можно выделить четыре стадии, которые отмечались в опытах на вязких жидкостях и на твердых материалах.

В опытах на вязких жидкостях (битуме и патоке) непрерывное развитие процесса перемещения фиксировалось на фотографиях (30—

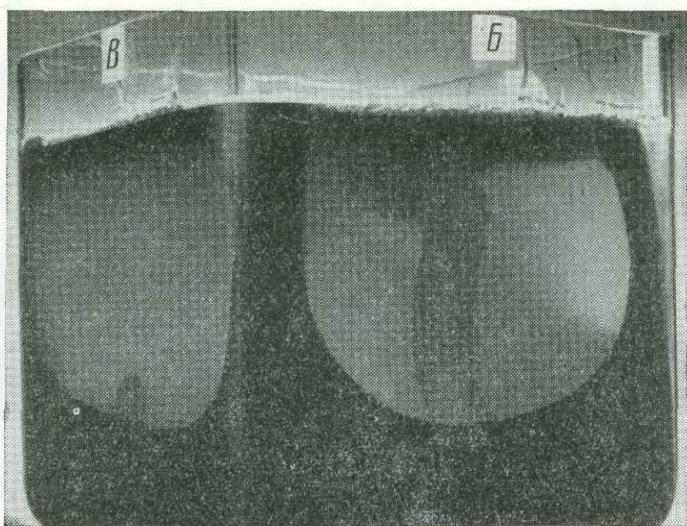


Рис. 32. Одна крупная ячейка адвективного движения в третьей стадии перемещения. Купола из битума прорванного типа грибообразной формы с навесами, внизу соединены перемычками. В пределах перемычки со стороны *B* образуется скрытоопрорванный купол. В центре ячейки расположена патока, она имеет форму крупной капли, опускающейся вниз.
(Опыт 37, кадр 38, вид со стороны *B* и *B*)

Исходные данные: внизу—битум 4 см; вверху—патока 12 см

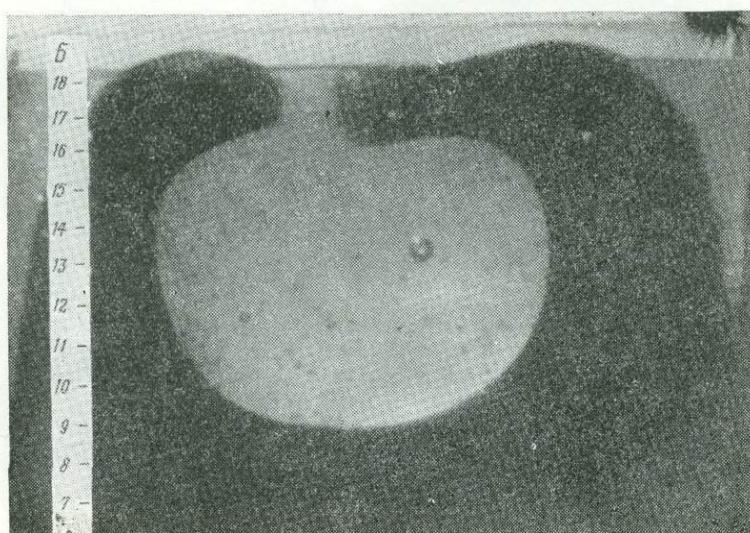


Рис. 33. Одна крупная ячейка адвективного движения в третьей стадии перемещения. Купола козырковой формы. (Опыт 107, кадр 11, вид со стороны *B*)

Исходные данные: внизу—55%-ный битум 8 см, вверху—патока 10 см

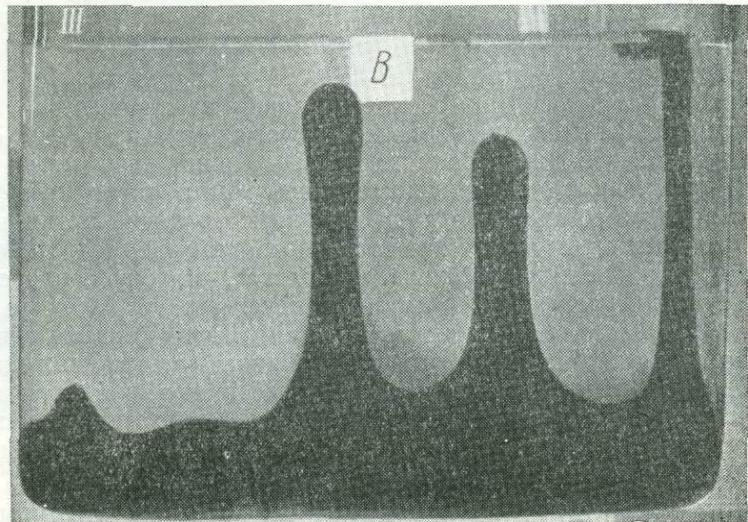
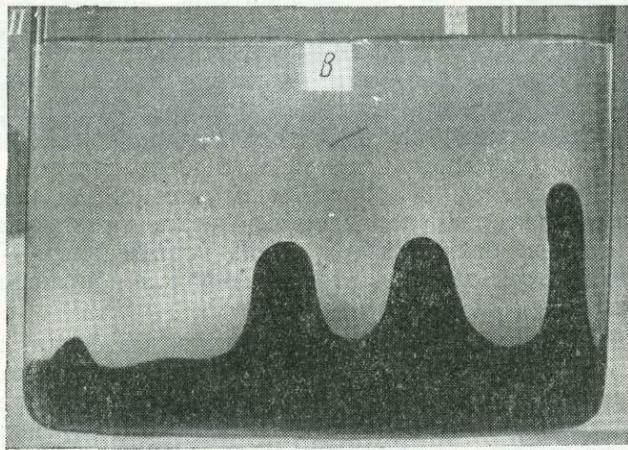
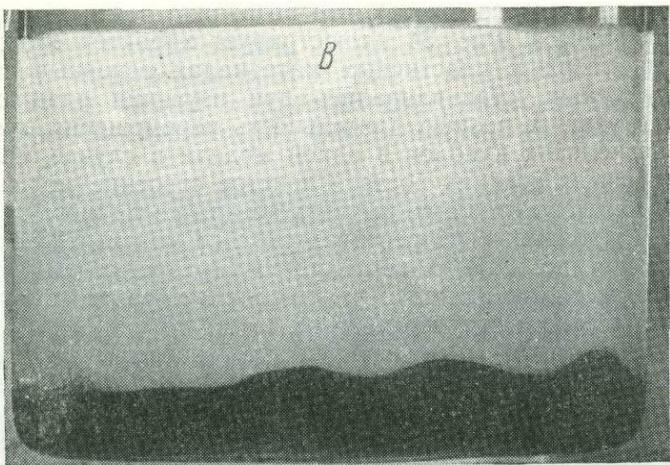
80 кадрами для каждого опыта), что позволило четко выделить основные стадии процесса. Рис. 34 иллюстрирует характер этого процесса. В опытах на твердых пластичных материалах основные стадии процесса перемещения устанавливались при изучении ряда однотипных моделей, испытавших разную длительность перемещения, или из сопоставления нескольких куполов в одной модели в случае, если они находились в разных стадиях роста. Слоистое строение моделей из пластичных материалов позволило выявить детали послойного перемещения материала. Наибольший интерес представляет модель 126 с тонкослоистой замазкой (рис. 35). В вертикальных разрезах этой модели на разных участках видны стадии перемещения и характер нарушений для них в тяжелом слоистом горизонте (рис. 36).

Рассмотрим стадии развития процесса. В начальный момент на границе неустойчивости можно предполагать появление малых хаотических возмущений разной длины волны, среди которых, по данным математических исследований американских геофизиков Ц. Дэйниса (Danes, 1964), М. А. Байота (Biot, 1963 а, в), М. А. Байота и Г. Оиде (Biot and Ode, 1965), Ф. Селинга (Seling, 1965) и шведского геолога Х. Рамберга (Ramberg, 1968), довольно скоро начинают выделяться доминирующие. Длина доминирующих волн определяется толщиной слоев легкого и тяжелого материала. Эти возмущения приводят к заметному искажению границы раздела, которая в вертикальном сечении получает вид пологой синусоиды. В опытах такой вид границы неустойчивости соответствует первой стадии процесса (см. рис. 34, I, 36, а). В этом случае неровности границы неустойчивости, направленные вверх и вниз, равны по высоте (глубине) и ширине. В вертикальном сечении I-I через модель 126 (см. рис. 36, а) при тонкой слоистости замазки видно, что слои замазки повторяют неровности поверхности каучука, над повышениями его они изгибаются вверх, а над понижениями — вниз. Мощность отдельных слоев замазки в повышениях и понижениях остается почти неизменной.

Во второй стадии процесса, когда легкий материал, поднявшись, оказывается в окружении тяжелого, а опустившийся тяжелый, напротив, в окружении легкого, наблюдается интенсивное внедрение легкого материала вверх. В опытах с битумом и патокой в вертикальном сечении на фоне плавной пологой волнистости начинают обособляться куполовидные поднятия из битума, разделенные более широкими и плоскими понижениями. В начале эти поднятия имеют округлую куполообразную форму (см. рис. 34, II, 37), а затем становятся колоннообразными (см. рис. 34, III).

В вертикальных разрезах II-II и IV-IV через модель 126 (см. рис. 36, б и 36, г справа) наблюдается поднятие каучуку на участках повышенного расположения границы неустойчивости первой стадии и образование как бы ядра соляного купола. Нижние горизонты слоистой замазки прорываются внедрившимся каучуком и около него залегают круто, а верхние ее слои над ядром образуют пологий антиклинальный изгиб. В пределах купола мощность слоев замазки сокращается, а в прогибах, окружающих купол, увеличивается, что обусловлено послойным перетеканием замазки со сводовой части купола. Верхние слои замазки в прогибах смяты в мелкие складки. С этой стадией связано начало формирования изолированных ячеек адвективного движения, представленных прерывистыми кольцевыми массивами и внутри них первичными компенсационными впадинами. Прерывистые кольцевые массивы состоят из отдельных невысоко поднятых куполов, размещенных вокруг первичных компенсационных впадин (рис. 38).

Третья стадия процесса перемещения в опытах с битумом и патокой намечается при достижении колоннообразными внедрениями из би-



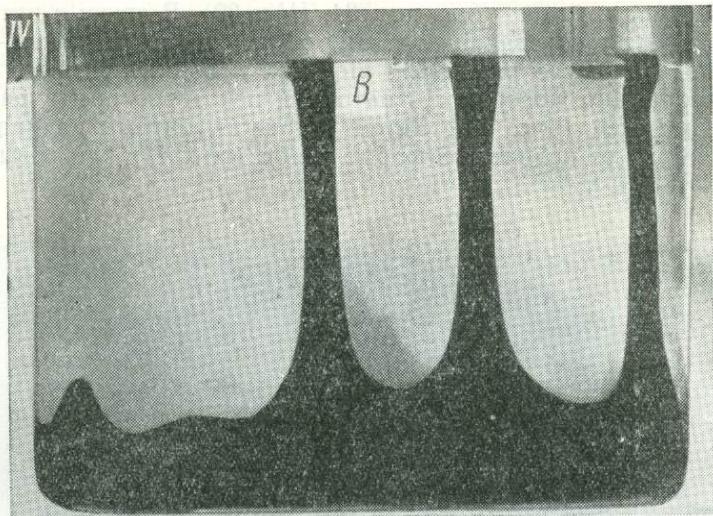


Рис. 34. Стадии перемещения на границе двух вязких жидкостей. (Опыт 36, вид со стороны В)

Фото сделано в момент времени, когда впадина в начале второй стадии достигла максимальной глубины.

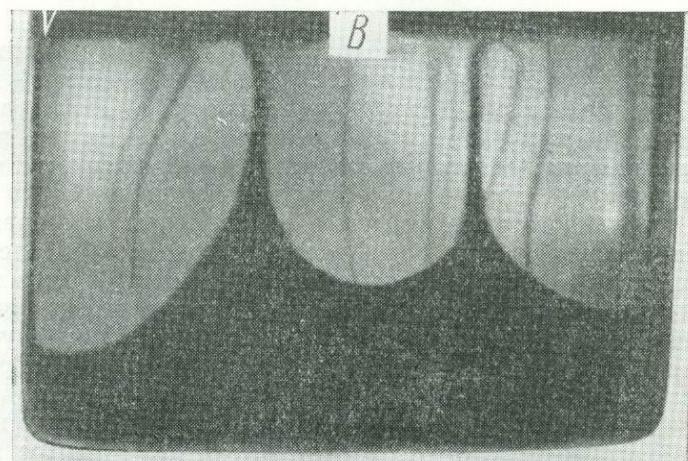


Рис. 34. Стадии перемещения на границе двух вязких жидкостей. (Опыт 36, вид со стороны В)

I — первая стадия (кадр 5); II — начало второй стадии (кадр 10); III — конец второй стадии, поперечник купола, достигшего поверхности патоки, равен примерно 1 см, т. е. первоначальной мощности битума (кадр 19); IV — начало третьей стадии, поперечник купола прорванного типа в несколько раз меньше поперечного размера впадины (кадр 20); V — конец третьей стадии (кадр 52).

Исходные данные см. рис. 29

тума поверхности патоки (см. рис. 34, IV и 39). В связи с интенсивным оттоком битума у основания поднятий образуются понижения — вторичные компенсационные впадины. Позднее колоннообразные поднятия битума прорывают поверхность патоки и некоторое время растут, возы wholeшась над ней (рис. 40). Затем эта часть битума начинает растекаться и образует поднятие в форме гриба (рис. 41) или козырька (см. рис. 34, IV и 42).

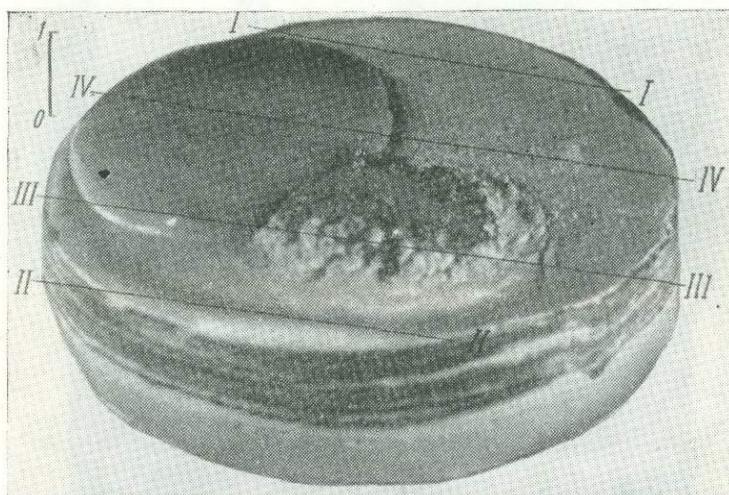


Рис. 35. Два купола прорванного типа (из каучука) на поверхности замазки. (Общий вид модели 126 с нанесенными линиями разрезов)

Исходные данные: внизу — каучук 6 мм, вверху — тонкослоистая замазка 16 мм (толщина одного слоя 1 мм), время вращения модели 10 мин при 300 г

Опыты с каучуком и замазкой (см. рис. 36, в, г слева) дают представление о третьей стадии неустойчивости, для которой характерно дальнейшее поднятие легкого каучука вверх. В этой стадии ядро поднятия, состоящее из каучука и имеющее вид колонны, прорывает замазку и выходит на поверхность модели. С приближением к ядру слои замазки приобретают крутое залегание и выклиниваются. В дальнейшем ядро прорванного типа, имеющее вид колонны, в основании утоняется, а в головной части расширяется. Первое обусловлено отжимающим действием со стороны замазки, опускающейся вниз и стремящейся вытеснить каучук вверху, а второе — растеканием каучука в головной части ядра по поверхности замазки. В последнем случае образуются карнизы или навесы ядра. Все вместе приводит к образованию ядра купола грибообразной формы.

Слои замазки в области утоненной части ядра залегают круто, а у расширенной его части (под навесами) имеют опрокинутое залегание и постепенно выклиниваются. Вследствие опрокинутого залегания слоев замазки под навесами ядра более низкие — «древние», ее слои располагаются над более высокими — «молодыми» (см. рис. 22).

Головная часть ядра из каучука сразу после прорыва им слоистой замазки имеет выпуклую поверхность, но вскоре на ней образуется вторичная впадина (см. рис. 22 и 43). Образование этой впадины связано с проседанием наиболее выпуклой части ядра из каучука вследствие его растяжения, а также с последующим растеканием каучука по поверхности замазки.

С образованием ядер куполов грибообразной формы в третьей стадии связано полное формирование ячеек адвективного движения, имеющих вид дугообразных или почти сплошных кольцевых массивов (см. рис. 20, 25—30, 32). В пределах кольцевых массивов прорванные купола соединяются высоко поднятыми перемычками.

В модели 14 в легком каучуке была создана слоистость, которая позволила выяснить характер перемещения материала в ядре купола

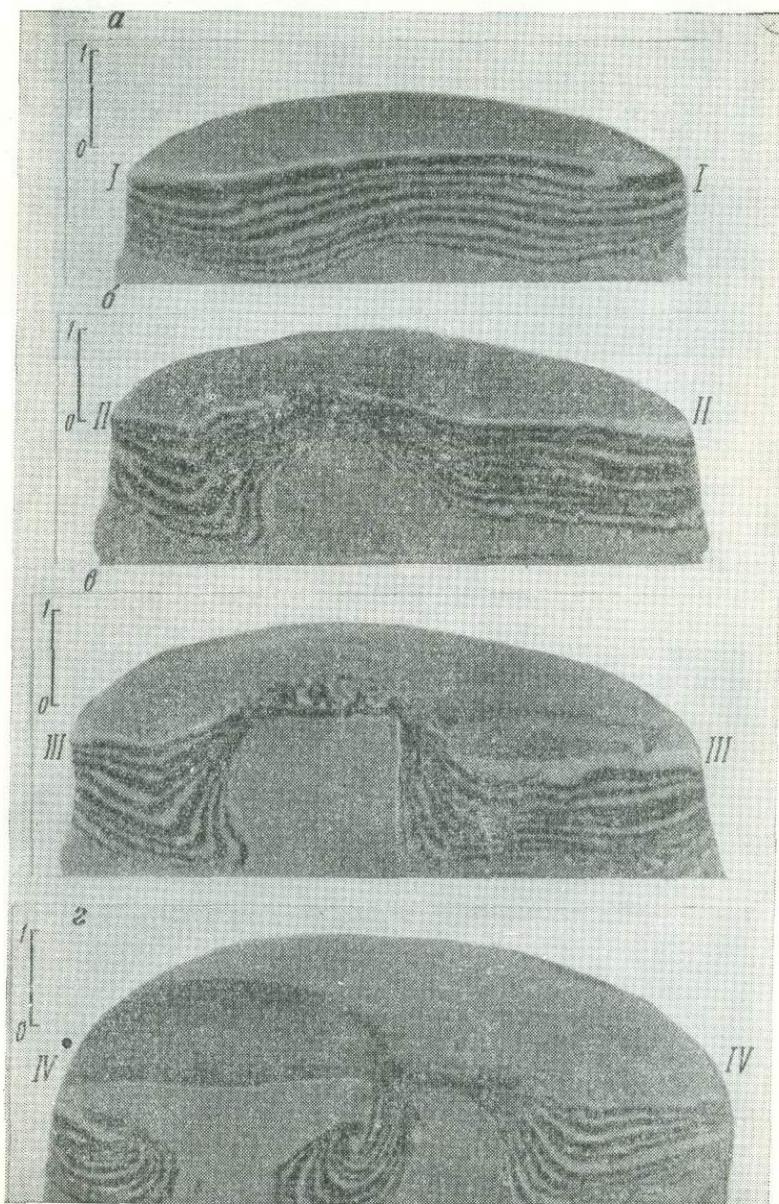


Рис. 36. Стадии перемещения на границе каучука и замазки.
(Вертикальные разрезы модели 126 по линиям, показанным на рис. 35)

a — первая стадия, купол типа «соляной подушки»; *b* — вторая стадия, купол скрытоопрванного типа; *c* — третья стадия, купол прорванного типа коленообразной формы; *d* — вторая (справа) и третья (слева) стадии, купол, отвечающий третьей стадии, прорванного типа грибообразной формы

(рис. 44). Первоначально внизу исходной модели располагался трехслойный каучук общей мощностью 15 мм; средний слой — красный каучук (на фото светло-серого тона), нижний и верхний слои — белый

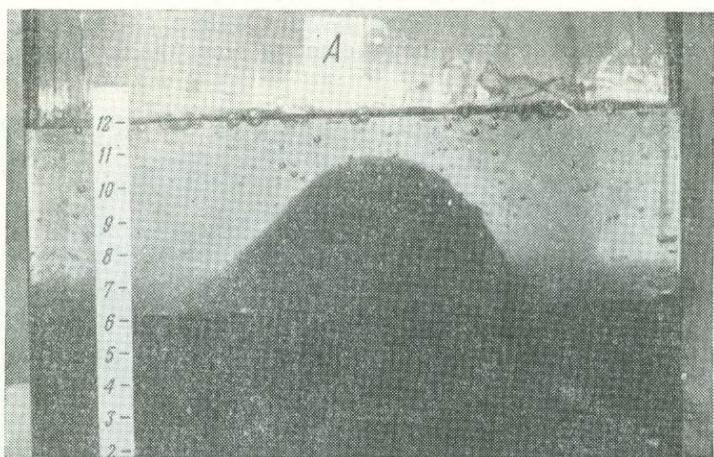


Рис. 37. Вторая стадия перемещения. Купол скрытопрорванного типа. (Опыт 76, кадр 5; вид со стороны А)
Исходные данные: внизу — битум 6 см; вверху — патока 6 см

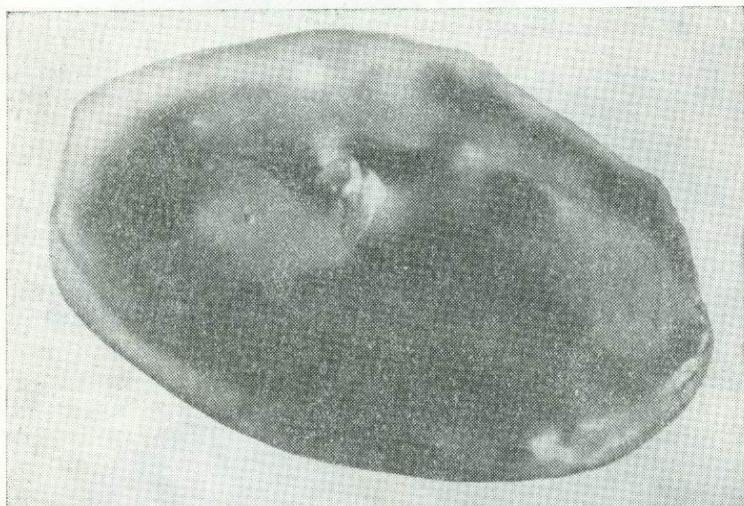


Рис. 38. Скрытопрорванные купола образуют вокруг впадины прерывистый кольцевой массив. (Модель 86 со снятой замазкой)
Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — замазка 16 мм, время вращения модели 3 мин при 300 g

каучук (темный тон), а вверху тяжелая двухслойная замазка (4-й и 5-й слои — серовато-белый и белый тон). После вращения модели в течение 2 мин при 600 g на ее поверхности образовались купола прорванного типа грибообразного вида, отвечающие третьей стадии развития неустойчивости.

В вертикальном разрезе конечной модели видно строение ядра купола из каучука и его взаимоотношение с перекрывающими слоями замазки. Верхний слой каучука полностью отжат со сводовой части ядра и из его основания в сторону карнизов или навесов, где он образует

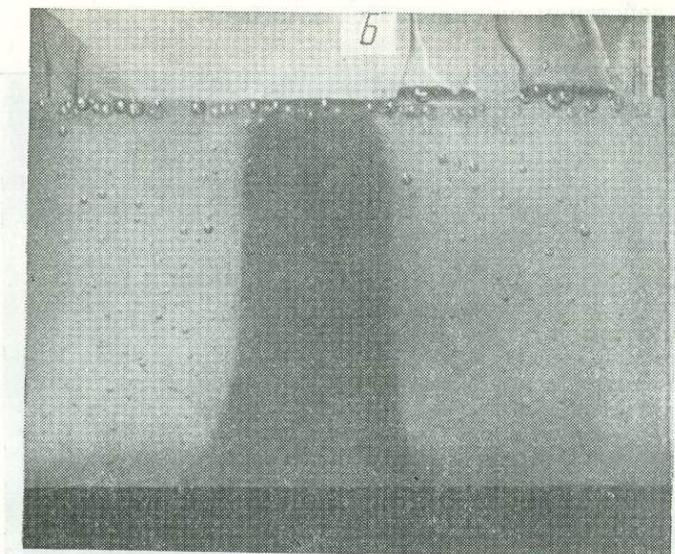


Рис. 39. Третья стадия перемещения. Купол прорванного типа колоннообразной формы. К моменту достижения поверхности патоки поперечник купола 4 см примерно равен первоначальной мощности битума. (Опыт 37, кадр 26, вид со стороны *Б*)

Исходные данные см. рис. 32

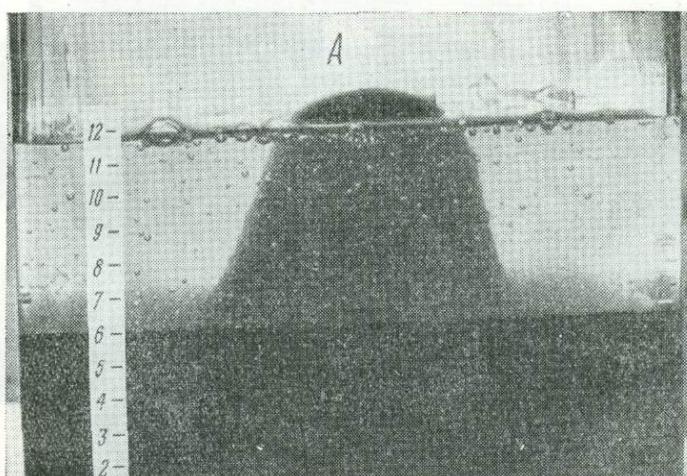


Рис. 40. Купол после прорыва слоя патоки возвышается над ее поверхностью. (Опыт 76, кадр 8, вид со стороны *A*)

Исходные данные: внизу—битум 6 см, вверху—патока 6 см

нижнюю периферическую часть навесов. Мощность среднего слоя каучука в сводовой части ядра и у его основания сокращена и увеличивается в сторону карнизов. Мощность нижнего слоя каучука также увеличивается в сторону навесов и сокращается у основания ядра. Со-

кращение мощности слоев каучука в головной части ядра с полным выклиниванием более «молодых» его слоев могло произойти в результате отжимания их во время поднятия ядра через замазку или при растекании каучука по поверхности ее после прорыва. Выклинивание и сокращение мощности слоев каучука у основания ядра связано с отжимающим действием опускающейся замазки.

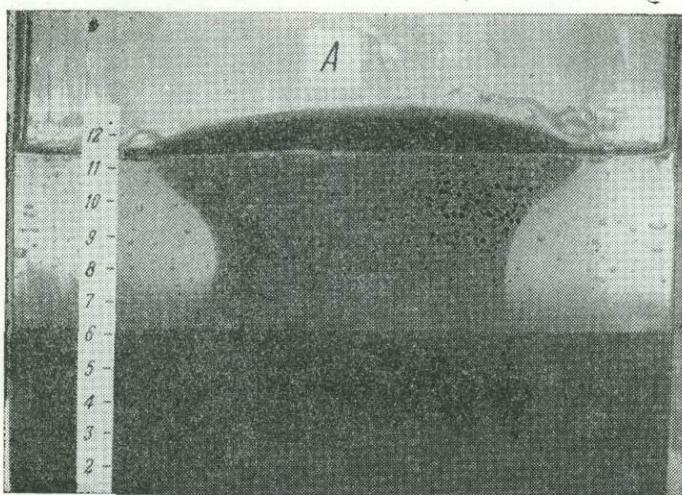


Рис. 41. Третья стадия перемещения. Купол прорванного типа грибообразной формы, с навесками. (Опыт 76, кадр 22, вид со стороны А)

Исходные данные см. рис. 40

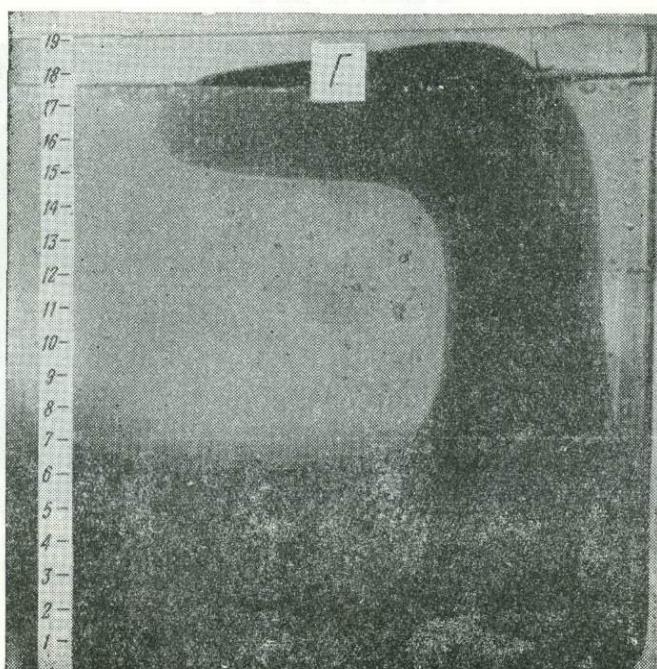


Рис. 42. Купол в виде козырька. (Опыт 78, кадр 28; вид со стороны Г)

Исходные данные: внизу—битум 6 см; вверху—патока 12 см

Итак, в результате деформации на участках навесов ядра более «молодые» (верхние) слои каучука расположены под более «древними» (средними) слоями. Необходимо отметить, что верхний слой каучука ядра (3-й), слагающий нижнюю часть навесов, располагается на ниж-

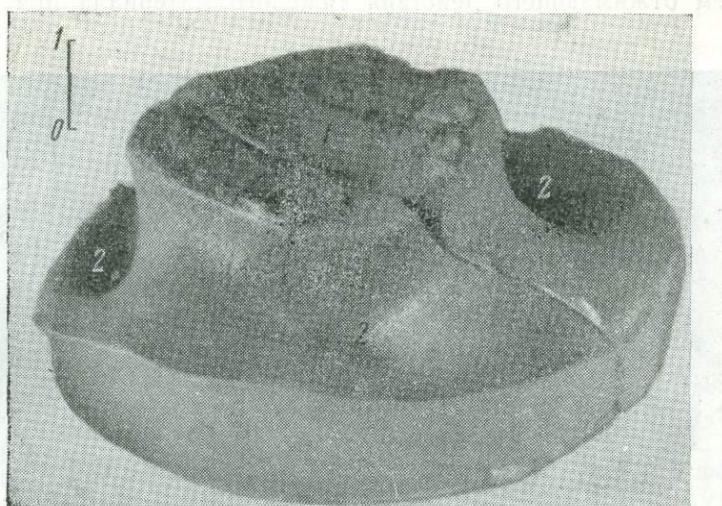


Рис. 43. Крупный купол прорванного типа, отвечающий третьей стадии перемещения, в рельефе поверхности каучука.
(Модель 135 со снятой замазкой)

1 — мульда в сводовой части купола (напоминает вдавленные мульды соляных куполов); 2 — вторичные компенсационные мульды у основания купола

Исходные данные: внизу — каучук 12 мм, вверху — замазка 8 мм, время вращения модели 3 мин при 300 г

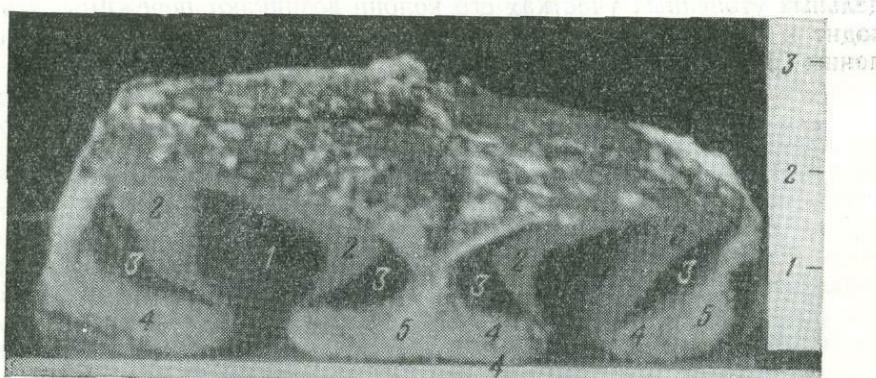


Рис. 44. Ядра прорванных куполов при слоистом их сложении. (Вертикальный разрез модели 14)

1, 2, 3 — слои ядра купола (легкий каучук); 4, 5 — слои перекрывающих пород (тяжелая замазка)

Исходные данные: внизу — трехслойный каучук 15 мм (каждый слой по 5 мм); вверху — двухслойная замазка 4 мм, время вращения модели 2 мин при 600 г

нем (4-м) «древнем» слое замазки. Это объясняется тем, что отжимающее действие замазки у основания ядра распространяется не только на слои ядра, но и на более «древние» слои замазки. При этом более «молодые» слои замазки при опускании отжимают более «древние» ее слои под навесы ядра и здесь создается как бы опрокинутое их залегание.

В процессе дальнейшего развития перемещения грибообразные поднятия каучука внизу утоняются и приобретают форму перевернутой капли (см. рис. 22, 23). Эта форма обычно указывает на ослабление интенсивности подтока легкого материала, связанное с уменьшением его количества внизу. Каплевидная форма обусловлена также усилением отжимающего действия тяжелого материала при его опускании.

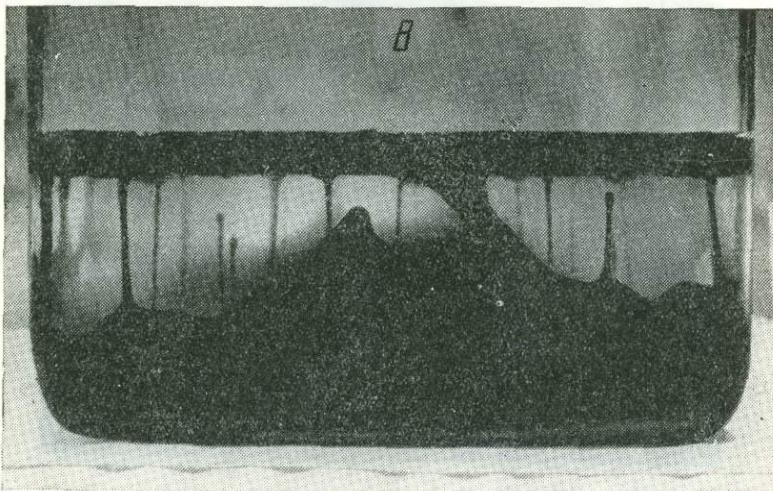


Рис. 45. Четвертая стадия перемещения. Большая часть битума переместилась вверх на место патоки. Купола в виде четок. (Опыт 50, кадр 43; вид со стороны В)

Исходные данные: внизу — битум 1 см; вверху — патока 6 см

При перетекании большей части легкого материала наверх в отдельных утоненных участках его колонн возникают пережимы, что приводит к образованию в вертикальном сечении четковидной формы колонны (рис. 45).

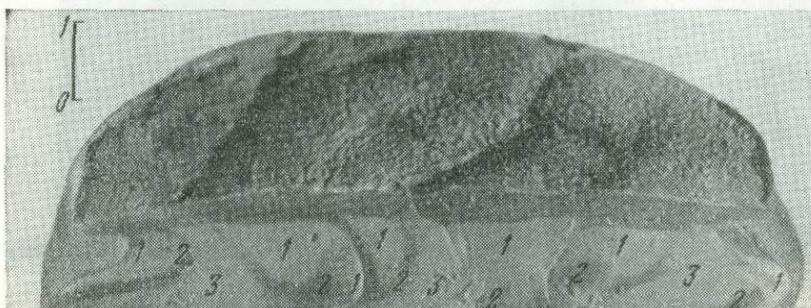


Рис. 46. Четвертая стадия перемещения. Легкий каучук почти полностью поднялся наверх. (Вертикальный разрез модели 58)

Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — трехслойная замазка 16 мм, время вращения модели 1 мин при 1000 г

Процесс перемещения двух вязких жидкостей и твердых пластичных материалов разной плотности заканчивается тем, что легкий слой поднимается и растекается по поверхности тяжелого слоя, а тяжелый опускается на место легкого (рис. 46). Это — четвертая стадия процесса перемещения, в которую движение прекращается.

Проявление той или другой стадии развития неустойчивости при одинаковом времени процесса перемещения зависит от факторов, определяющих скорость процесса: мощности и вязкости легких и тяжелых слоев и разности их плотности.

Купола двух генераций и их взаимоотношение. Куполовидные поднятия кольцевых массивов, образующиеся при поднятии легкого материала на периферии ячеек, являются куполами первой генерации. Ядра этих куполов могут находиться в разных стадиях перемещения: одни из них прорывают тяжелый слой, другие останавливаются на некотором расстоянии от поверхности модели (см. рис. 20, 28, 29, 31).

Среди поднятий кольцевых массивов по форме выделяются: 1) куполовидные поднятия — прорванные и скрытое прорванные; 2) крупные купола, обычно прорванные, основание которых имеет звездчатую форму, так как они расположены в узлах пересечения нескольких смежных ячеек; 3) валообразные поднятия, образующиеся при соединении нескольких куполов поднятыми перемычками; 4) перемычки, погруженные и поднятые, соединяющие поднятия в кольцевые массивы (см. рис. 20, 25, 26, 28). Основная форма поднятий кольцевых массивов — куполовидное поднятие, остальные формы являются производными.

По размерам и характеру строения ядер купола кольцевых массивов могут быть подразделены на два вида: главные, к которым относятся крупные прорванные купола (часто звездчатой формы), и сопутствующие, представленные отдельными мелкими куполами и валообразными поднятиями. Возможно, что возникновение первых приводит к началу образования кольцевых массивов.

В третьей стадии неустойчивости внутри кольцевых массивов одновременно с завершением формирования в пределах конвективных ячеек куполов первой генерации формируются купола второй генерации. К началу возникновения куполов второй генерации оставшийся под первичными прогибами легкий материал имеет неодинаковую мощность. На периферии первичных компенсационных впадин у основания ядер куполов первой генерации вследствие интенсивного оттока материала легкого слоя в эти ядра образуются вторичные компенсационные впадины (см. рис. 42), что приводит к сокращению на этих участках мощности легкого слоя. Наибольшее сокращение мощности легкого слоя наблюдается у основания более крупных куполов.

Внутри кольцевых массивов, в пределах первичных компенсационных впадин, где отток легкого материала к куполам первой генерации оказывается в минимальной степени, остаются линзовидные утолщения слоя легкого материала. В этих условиях внутри кольцевого массива, в первичном прогибе, на границе раздела двух материалов может образоваться антиклинальный изгиб (рис. 47, 48). При значительном перемещении, когда отжимающее действие тяжелого слоя внизу приводит к утонению оснований куполов первой генерации и даже к полному их пережиму, движение легкого материала по отдельным ячейкам может прекратиться. Если при этом внизу в пределах первичных впадин остается легкий материал, часто сохраняющийся в виде линз на некотором расстоянии от куполов первой генерации, то он может образовать купола второй генерации (рис. 49—51).

Образование куполов второй генерации хорошо видно в опытах на каучуке и замазке (см. рис. 47, 48, 50) и на вязких жидкостях — битуме и слоистой канифоли (см. рис. 51) и битуме и патоке (рис. 52). Вертикальные разрезы моделей из слоистого каучука и замазки (см. рис. 49 и 50 слева) и замороженного битума и слоистой канифоли (см. рис. 51) дают наглядное представление об условиях формирования куполов второй генерации и их взаимоотношения с куполами первой генерации.

Купола второй генерации размещены в пределах впадин первой генерации и отделены от куполов первой генерации вторичными компенсационными впадинами. Последние расположены в пределах периферических частей первичной впадины у основания куполов первой



Рис. 47. Взаимоотношение куполов первой и второй генераций. (Вертикальный разрез модели 65 по линии I-I)

1 — скрытопрорванный купол первой генерации (в верхней его части каплевидное расширение); 2 — первичные компенсационные впадины; 3 — поднятие нижних слоев замазки в первичной компенсационной впадине над линзой остаточного каучука; 4 — линзы остаточного каучука; 5 — вторичные компенсационные впадины
Исходные данные: внизу — каучук 5 мм, вверху — шесть слоев замазки общей мощностью 32 мм; время вращения модели 6 мин при 300 г

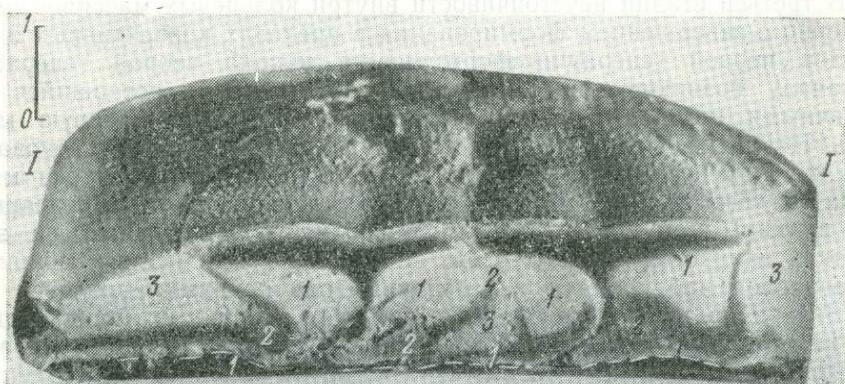


Рис. 48. Колонны куполов первой генерации пережаты. Во впадинах первой генерации (первичных компенсационных мульдах) видна деформация слоев замазки и линзы остаточного каучука (выделены пунктиром), над которыми нижние слои замазки поднялись и образовали пассивные соляные поднятия. Вокруг этих поднятий выделяются вторичные компенсационные впадины.

(Вертикальный разрез модели 59 по линии I-I)

1, 2 и 3 — нижний, средний и верхний слой замазки
Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — трехслойная замазка 16 мм, время вращения модели 45 сек при 1000 г

генерации. Купола второй генерации обычно более мелкие, чем купола первой генерации, и ядра их глубоко погружены. Рост этих куполов указывает на изменение направления перемещения материала в пределах первичных впадин, т. е. на инверсию движения. Первоначальное перемещение в первичной впадине слоев тяжелого материала вниз, в результате роста этих куполов, сменяется перемещением его вверх (см. рис. 49, 50 слева — поведение среднего слоя замазки и рис. 51 справа — поведение тонких слоев канифоли).

При сравнительно большой мощности легкого материала (10—12 см и больше) возникновение куполов второй генерации не отмечается, так как большая мощность легкого битума может поддерживать рост куполов первой генерации более долгое время.

Основные формы адвективных структур. Формы адвективных структур зависят от отношения мощностей легкого и тяжелого слоев.

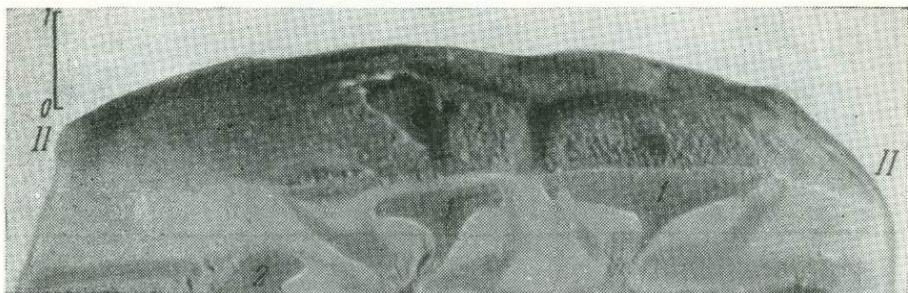


Рис. 49. Взаимоотношение куполов первой и второй генераций. (Вертикальный разрез модели 59 по линии II-II)

1 — купол первой генерации в виде перевернутой капли; 2 — купол второй генерации скрытопрорванного типа в пределах впадины первой генерации.

Исходные данные см. рис. 48

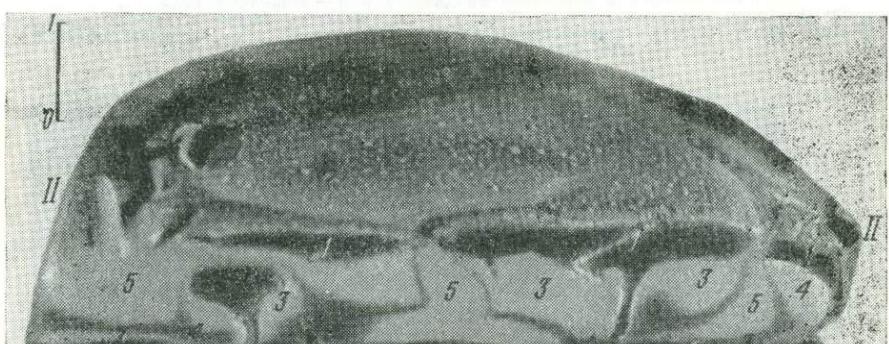


Рис. 50. Взаимоотношение куполов первой и второй генераций. (Вертикальный разрез модели 60 по линии II-II)

1 — купол первой генерации прорванного типа; 2 — купол второй генерации скрытопрорванного типа в пределах впадин первой генерации; 3, 4 и 5 — нижний, средний и верхний слои замазки.

Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — трехслойная замазка 16 мм, время вращения модели 50 сек при 1000 г

В отдельной серии опытов на каучуке и замазке мощности слоев изменились, а общая мощность их оставалась равной 20 мм. При этом были приняты три варианта, обусловившие основные типы соотношений поднятий и впадин в ячейках адвективного движения: 1) мощность слоя легкого каучука меньше мощности слоя тяжелой замазки; 2) мощности этих слоев равны; 3) мощность слоя каучука больше мощности слоя замазки. Формы адвективных структур в этих трех вариантах рассматриваются для третьей стадии неустойчивости.

На вязких жидкостях не все варианты удалось изучить, так как при большой мощности легкой жидкости одна ячейка в приборе полностью не помещается и соотношения поднятий и впадин в нем не ясны.

Для первого варианта (мощность каучука 4 мм и замазки 16 мм) характерно образование небольших куполов из легкого каучука, разделенных широкими впадинами, выполнеными тяжелой замазкой.

Впадина расположена в центре ячейки адвективного движения, а купола на ее периферии. Купола смежных ячеек являются общими (рис. 53, А, Б). В горизонтальных сечениях их размещение следующее: на высоких уровнях среза вокруг широких чашеобразных впадин в виде

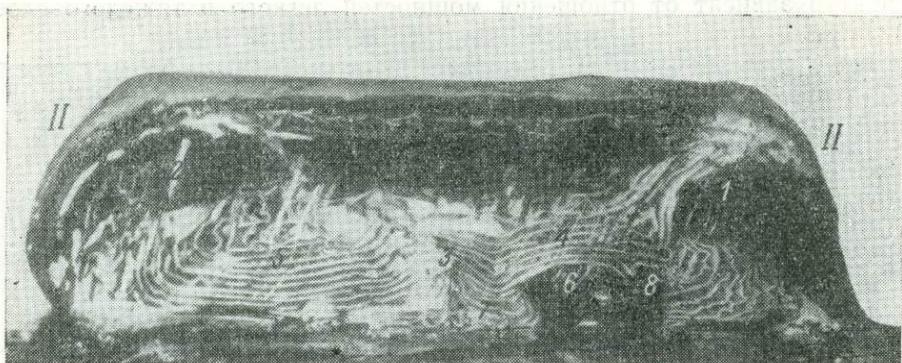


Рис. 51. Две адвективные ячейки в конце третьей стадии перемещения. (Вертикальный разрез модели 171)

1 и 2 — купола первой генерации; 3 — купол первой генерации в виде четки, общий для двух ячеек; 4 и 5 — первичные впадины; 6 — скрытопрорванный купол второй генерации, расположенный в первичной впадине; 7 и 8 — вторичные впадины.
Исходные данные: внизу — 50%-ный битум 4 см, вязкость $2.5 \cdot 10^3$ пуз — В. плотность 0,97—1,001 г/см³; вверху — тонкопористая 70%-ная канифоль, 6 см, вязкость более 5.8×10^4 — $5.4 \cdot 10^5$ пуз, плотность 1,03 г/см³

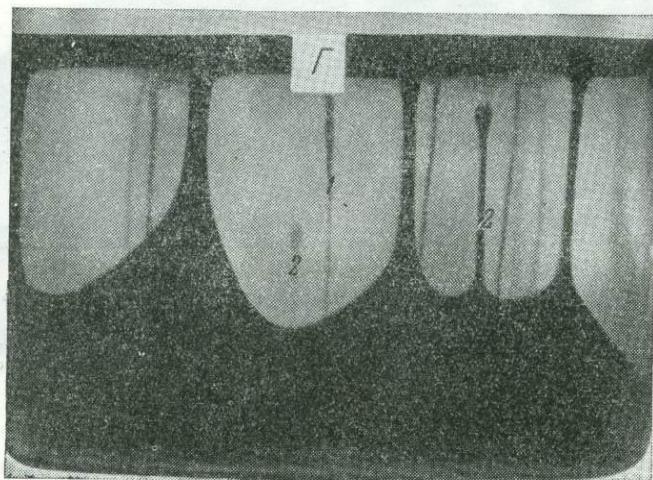


Рис. 52. Третья стадия перемещения. Между куполами первой генерации (в первичных впадинах) образуются купола второй генерации. Купола первой генерации (1), связанные с формированием ячеек адвективного движения, в конце третьей стадии уменьшаются в поперечных размерах и превращаются в четкообразную полосу; купола второй генерации (2) имеют небольшие поперечные размеры и каплеобразные расширения вверху. (Опыт 36; вид со стороны Г).

Исходные данные см. рис. 29

кольцевых цепочек расположены небольшие округлые и овальные куполовидные поднятия, которые на более низких уровнях среза объединяются в валообразное или в общее кольцевое поднятие. Локальные куполовидные поднятия на более высоком уровне среза могут

рассматриваться как выступы — апофизы кольцевого основания. При небольшой высоте куполов кольцевое расположение их вокруг впадин более четко выражено на низких уровнях среза, а на более высоких уровнях оно проявляется не всегда.

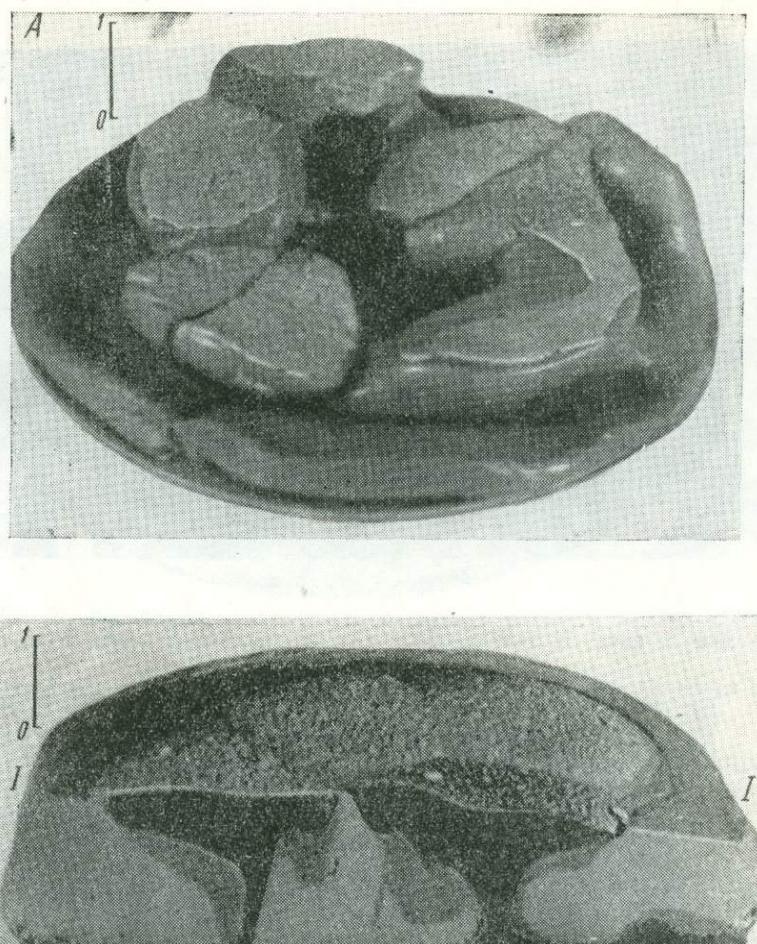


Рис. 53. Первый тип соотношения поднятий и впадин в ячейках адвективного движения на пластических материалах (*A* — общий тип модели 116 со снятой замазкой; *B* — ее вертикальный разрез). Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — замазка 16 мм, время вращения модели 2 мин при 300 г

В опытах на битуме и патоке, битуме и слоистой канифоли в первом варианте также наблюдается образование в центре ячеек широких впадин, а на их периферии — небольших куполов. Такое сочетание форм поднятий и впадин, как это видно из опытов 36 (см. рис. 31) и 171 (см. рис. 51), сохраняется при различных отношениях вязкости легкой и тяжелой жидкостей. В опыте 36 вязкость 55%-ного легкого битума ($2,4 \cdot 10^5$ — $1,2 \cdot 10^6$ пуаз — П) больше вязкости тяжелой патоки ($1,4 \cdot 10^3$ — $3,2 \cdot 10^3$ пуаз — П), а в опыте 171 вязкость 50%-ного легкого битума ($2,5 \cdot 10^3$ — В) меньше вязкости тяжелой тонкослоистой 70%-ной канифоли (более $5,8 \cdot 10^4$ — $5,4 \cdot 10^5$ пуаз — П).

Во втором варианте (при мощности каучука и замазки по 10 мм в опыте 110 и мощности битума и патоки по 6 см в опыте 97) купола и разделяющие их впадины примерно одинаковы по форме и равны

по размерам (рис. 54, 55). По сравнению с первым вариантом, куполов на площади меньше, а размеры их более крупные.

В третьем варианте (при мощности каучука 16 мм и замазки 4 мм в модели 112 и мощности каучука 12 мм и замазки 8 мм в модели 113) в вертикальном сечении наблюдаются еще более крупные купола из

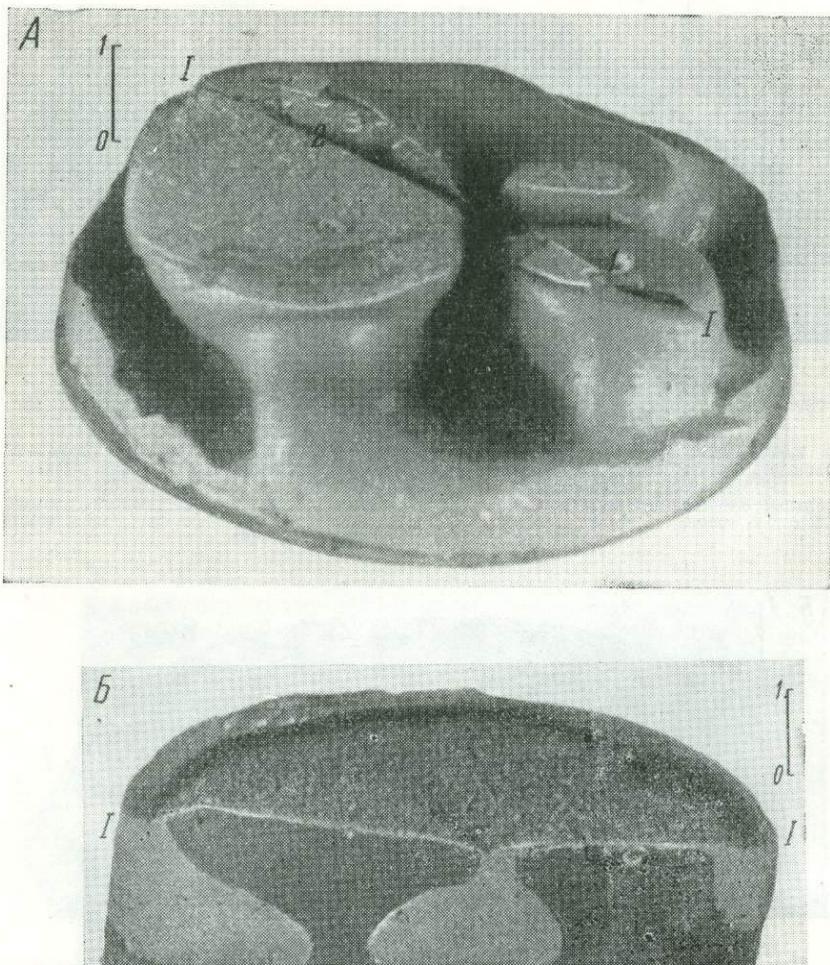


Рис. 54. Второй тип соотношений поднятий и впадин в ячейках адвективного движения на пластических материалах (*A* — общий вид модели со снятой замазкой; *B* — ее вертикальный разрез)

1 — куполовидное и 2 — валообразное поднятие.

Исходные данные: мощность каучука (10 мм) равна мощности замазки (10 мм), время вращения модели 1 мин при 300 г

легкого каучука, сочетающиеся с узкими впадинами, выполненными тяжелой замазкой (рис. 56, *B*). В горизонтальном сечении поднятия из легкого каучука окружены цепочкой овальной формы впадин из тяжелой замазки. В этом случае в центре ячейки расположено крупное поднятие, а по ее краям — опускания с небольшими поперечными размерами (рис. 56, *A*).

В опытах на патоке и жидким стекле, и битуме и патоке в третьем варианте в центре ячейки также образуются широкое плоское поднятие, а на периферии узкие глубокие прогибы. Указанное сочетание форм поднятий и прогибов, как видно из опытов 143 (рис. 57) и 83

(см. рис. 64), сохраняется при разных соотношениях вязкости легкой и тяжелой жидкостей. В опыте 143 вязкость легкой патоки ($1,2 \times 10^2$ пузаз — В) меньше вязкости тяжелого жидкого стекла ($1,5 \cdot 10^2$ — $8 \cdot 10^2$ пузаз — П или $3,3 \cdot 10^2$ пузаз — В), а в опыте 83 вязкость легкого битума ($2,4 \cdot 10^5$ — $1,2 \cdot 10^6$ пузаз — П) больше вязкости тяжелой патоки ($1,4 \cdot 10^3$ — $3,2 \cdot 10^3$ пузаз — П). В опыте 143 (см. рис. 57) прогибы из

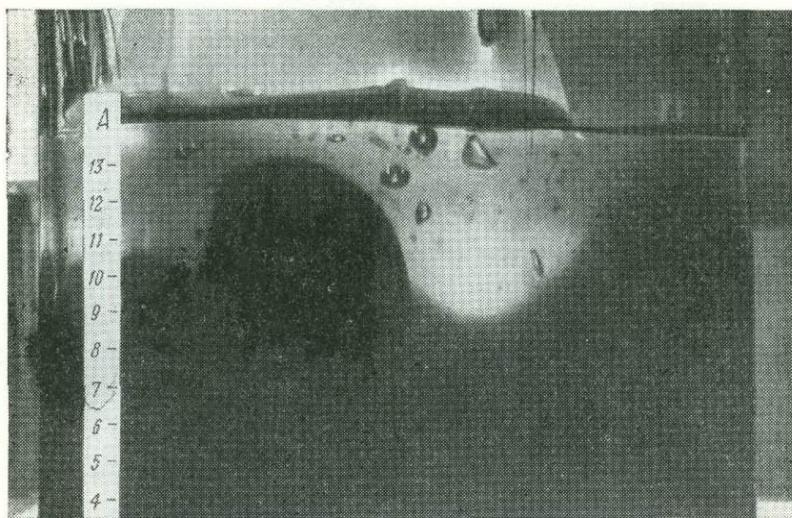


Рис. 55. Второй тип соотношений поднятий и впадин в ячейках адвективного движения на вязких жидкостях. (Опыт 97, кадр 2, вид со стороны А)

Исходные данные: внизу — битум 6 см, вязкость немногим меньше $7,5 \cdot 10^2$ — $1,8 \cdot 10^3$ пузаз; вверху — патока 6 см, вязкость $1,4 \cdot 10^3$ — $3,2 \cdot 10^3$ пузаз

жидкого стекла внизу заканчиваются характерными расширениями. Наличие последних можно объяснить тем, что давление в нижней части этих внедрений было максимальным и легкая патока отсюда отжималась быстрее. О характере движения жидкого стекла можно судить по ориентировке погруженного в него настриженного волоса.

Из рассмотренного следует также, что с увеличением мощности легкого слоя поперечные размеры куполов увеличиваются, а количество их уменьшается. Это сопровождается уменьшением поперечных размеров впадин.

Деформации, близкие по форме к полученным в опытах, были описаны Е. В. Артюшковым (1963, 1965) для грунтов. Он выделил конвективные деформации центрального типа, когда каждая ячейка состоит из центрального прогибания и краевых поднятий и деформации краевого типа, в которых в центре ячейки наблюдается поднятие, а по краям ее — опускания. По данным изучения конвективных деформаций в грунтах, Е. В. Артюшковым было показано, что деформации в ячейках определяются более вязкой породой.

Если использовать принятую Е. В. Артюшковым терминологию, то рассматриваемые в опытах структуры первого варианта могут быть названы адвективными структурами центрального проседания, а третьего варианта — структурами краевого проседания. В горизонтальном срезе в обоих случаях наблюдается система периодически повторяющихся кольцевых структур.

По данным опытов, три основных типа сочетания структур в адвективных ячейках определяются отношением величины мощности легкого слоя к мощности тяжелого и не зависят от вязкости этих

веществ. Для каждого типа структур характерно также изменение их по стадиям. В природе более распространен первый вариант, чем два других. В районах развития соляных структур мощность соли обычно меньше мощности перекрывающих ее пород. Мощность менее

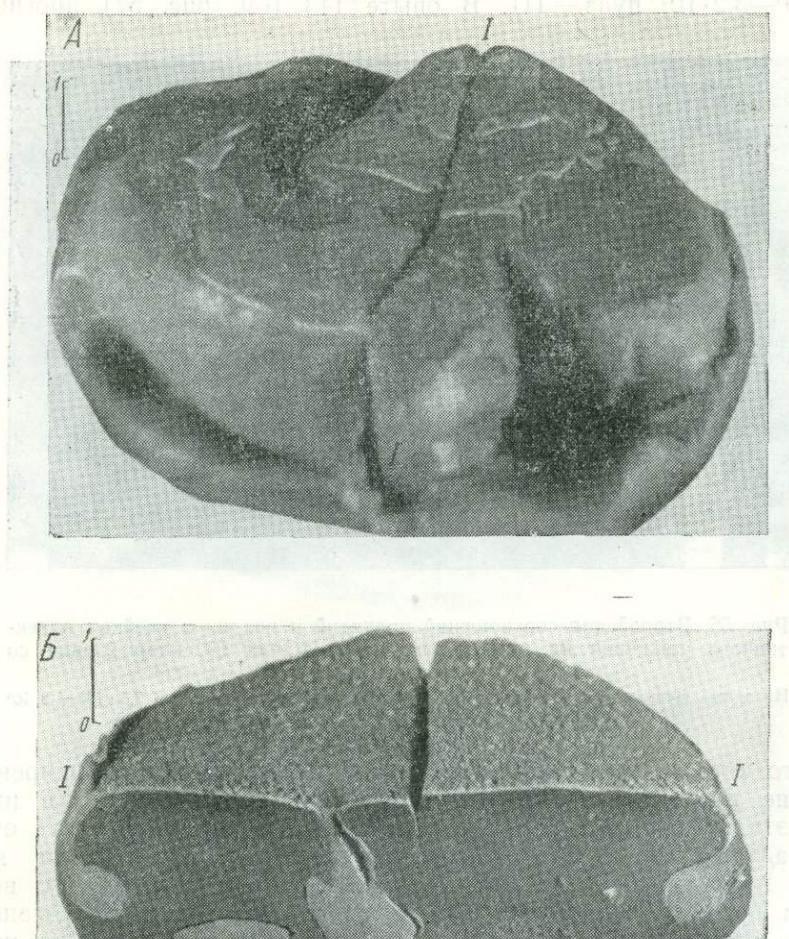


Рис. 56. Третий тип соотношений поднятий и впадин в ячейках аддективного движения на пластичных материалах (*A* — общий вид модели 113 со снятой замазкой; *B* — ее вертикальный разрез по линии *I-I*)

Исходные данные: внизу — каучук 12 мм, вверху — замазка 8 мм, время вращения модели 2 мин при 300 г

плотного вещества волновода также, видимо, меньше мощности верхней части мантии, расположенной выше волновода. Для тех и других структур характерно развитие аддективных структур центрального проседания.

Характер нарушений в тонкослоистом тяжелом горизонте для типа аддективных структур центрального проседания. В одной серии опытов с тяжелой жидкостью путем замораживания и промазывания ее слоев каолиновой глиной была создана тонкая слоистость — опыты 167, 171, 173 и 177 (см. рис. 51, 58, 59). В качестве тяжелой жидкости использовались 50 и 70 %-ная смеси канифоли с машинным маслом¹ мощ-

¹ В этой смеси 70% канифоли и 30% машинного масла.

нностью 4 или 6 см, а в качестве легкой жидкости 50 и 55%-ный битум мощностью 4 см. Данные о плотности и вязкости этих веществ приведены в табл. 2.

Опыты проводили в деревянном четырехугольном ящике с откидными боковыми стенками. Размер ящика 30×30 см, высота 15 см.

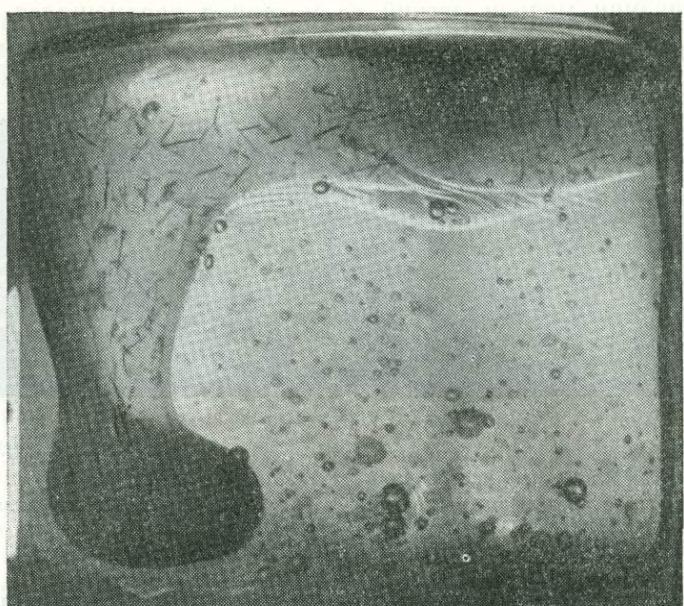


Рис. 57. Начало третьей стадии перемещения при большей вязкости тяжелого жидкого стекла. (Опыт 143)

Исходные данные: внизу — патока 6 см, вязкость $1,2 \cdot 10^2$ пузаз — В, плотность $1,42 \text{ г}/\text{см}^3$; вверху — жидкое стекло 3 см с погруженным в него настриженным волосом, вязкость $1,5 \cdot 10^2 - 8 \cdot 10^2$ пузаз — П, плотность $1,6 \text{ г}/\text{см}^3$



Рис. 58. Первая стадия перемещения. (Вертикальный разрез модели 167)

Исходные данные: внизу — битум 4 см, вязкость $2,4 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^6$ пузаз — П, плотность $0,97 - 1,004 \text{ г}/\text{см}^3$; вверху — 50%-ная слоистая канифоль 4 см с тонкими промазками каолиновой глины, вязкость менее $5,8 \cdot 10^4 - 5,4 \cdot 10^5$ пузаз — П, плотность $1,002 \text{ г}/\text{см}^3$

В дне ящика в центре его имелся квадратный вырез размером 10×10 см, в который была вделана железная пластинка. Модель приготавливали следующим образом: сначала в ящик заливали 50 или 55%-ный битум и замораживали, затем сверху послойно заливали 50- или 70%-ную канифоль. Мощность отдельных слоев канифоли со-

ставляла примерно 2—2,5 мм. После заливки каждого слоя канифоли модель помещали в холодильник. Слоистость в канифоли создавалась путем смазывания поверхности ее слоев жидкой каолиновой глиной. Исходную модель затем полностью размораживали. Модель оттаивала неравномерно: быстрее в периферических частях и медленнее внутри, поэтому ее немного подогревали снизу через металлическую пластинку. При оттаивании модели легкий ее материал перемещался с границы



Рис. 59. Две адвективные ячейки в начале четвертой стадии перемещения. (Вертикальный разрез модели 171 по линии III-III)

1 и 2 — купола первой генерации; 3 — след от купола первой генерации (общий для двух ячеек);
4 и 5 — первичные впадины.
Исходные данные см. рис. 51

неустойчивости вверх, а тяжелый вниз, и слои деформировались. После деформации модель вновь замораживали и затем разрезали в пятидесяти вертикальных сечениях.

В этой серии опытов удалось наблюдать разные стадии перемещения. В опыте 167 (см. рис. 58) граница между битумом и канифолью представляет собой плавную кривую, что соответствует первой стадии перемещения. Нижние слои канифоли повторяют неровности этой границы. В местах более высокого ее положения мощность канифоли сокращена, в местах более низкого положения — увеличена.

В остальных опытах этой серии картина перемещения битума и слоистой канифоли отвечает концу третьей стадии. В этих опытах в процессе перемещения материала в центре ячеек образовывались широкие прогибы, выполненные тонкослоистой тяжелой канифолью, а по краям узкие поднятия из легкого битума, т. е. адвективные структуры центрального проседания. Такой тип адвективных структур обусловлен здесь меньшей мощностью легкой жидкости по сравнению с тяжелой.

Так, в вертикальных разрезах модели 171 (см. рис. 51 и 59) видно, что значительная часть битума переместилась вверх. В плоскости разрезов битум перемещался по двум боковым и одному центральному поднятиям, имеющим небольшие поперечные размеры. От центрального поднятия остался только след. На место битума вниз спустилась толща слоистой тяжелой канифоли. Поднявшимся битумом она разорвана на два изолированных участка, имеющих вид широких чашеобразных впадин.

По расположению тонких слоев канифоли, изменению их толщины, степени смятости и разрывам в тонких промазках глины можно судить о направлении движения материала и о характере приложения сил при его перемещении. Нижние слои канифоли в центральной части прогибов залегают горизонтально, мощность их здесь стала меньше, а прослойки глинистого материала разорвались. По бокам прогибов

нижние слои канифоли резко задираются вверх и у основания ранее существовавшего центрального купола залегают круто, а вверху опрокидываются к центру прогиба. Концы их здесь обрываются. Более высокие слои канифоли в прогибах сильно смяты и образуют сложные складки, опрокинутые внутрь прогиба.

Нижние слои канифоли в прогибах испытывают, с одной стороны, сжатие (под действием опускающихся более высоких ее слоев), а с другой — растяжение (в связи с растеканием канифоли после опускания от центра прогиба в стороны). Резкий изгиб слоев канифоли вверх и вертикальное залегание их на периферии впадин связаны с поднятием легкого битума. Сильная смятость верхних слоев канифоли образуется вследствие их сжатия под действием внедрившихся колонн битума и растекания последнего по поверхности канифоли.

Образование в первичной впадине купола второй генерации из линз остаточного битума хорошо видно на вертикальном разрезе модели 171 (см. рис. 51 справа). На границе неустойчивости здесь изменяется направление движения: опускание канифоли сменяется ее поднятием. К началу образования куполов второй генерации перемещение по первичным каналам заканчивается и от купола первой генерации остается только след в виде деформации слоев тяжелого горизонта.

Изменения поперечных размеров адвективных ячеек, куполов и расстояний между ними. Закономерности изменения поперечных размеров ячеек, куполов и расстояний между ними выявлены главным образом по результатам опытов на вязких жидкостях (битуме и патоке) и частично на пластичных твердых материалах. Рассмотрим результаты опытов на битуме и патоке.

Поперечные размеры адвективных ячеек, каждая из которых состоит из двух полупоперечников куполов и поперечника разделяющей их впадины, определяются мощностью легкого битума и превышают ее в 3—7 раз. С увеличением мощности битума размеры ячеек увеличиваются в меньшее число раз (табл. 4).

Эта закономерность получена в двух сериях опытов с 55%-ным битумом (вязкость $2,4 \cdot 10^6$ — $1,2 \cdot 10^6$ пуаз — П и плотность $0,97$ г/см³) и

Таблица 4

Влияние мощности битума на поперечные размеры ячеек, куполов и впадин

Серия опытов	Мощность, см		Отношение размера ячеек к мощности битума	Размер купола *, см	Количество куполов первой генерации на площади сосуда 20×20 см, штук	Расстояние между куполами, см	Отношение расстояния между куполами к размеру купола	Номер опыта
	битума	патоки						
I	1	6	7	1	16—25	6	6	50
	2	6	9,5	2	8—10	7,5	4	68
	3	6	10,5	3,5	2—3	7,5	2,5	75
	4	6	12	3	1	8	2	38
	4	6	12	4	1	8	2	35
	6	6	>20	—	6—7	1	—	76
	8	6	>20	—	8	1	—	106
	12	6	>20	—	11,2	1	—	83
II	1	12	7	1	22	6	6	36
	2	12	9,5	5	5	7,5	4	77
	4	12	12	3	1	8	2	37
	6	12	14	2,3	6	1	8	107
					12,6			

* Поперечник купола измерялся в момент достижения им поверхности патоки.

патокой I сорта (вязкость $1,4 \cdot 10^3$ — $3,2 \cdot 10^3$ пуз.—П и плотность 1,42 г/см³) при мощности патоки 6 и 12 см. Из табл. 4 видно, что в первой серии опытов при небольшой толщине слоя битума (1 см) размер ячейки больше мощности битума в 7 раз; при толщине слоя битума в 2 см он превышает мощность бигума в 5 раз, а при толщине слоя битума в 4 см — только в 3 раза. В другой серии опытов

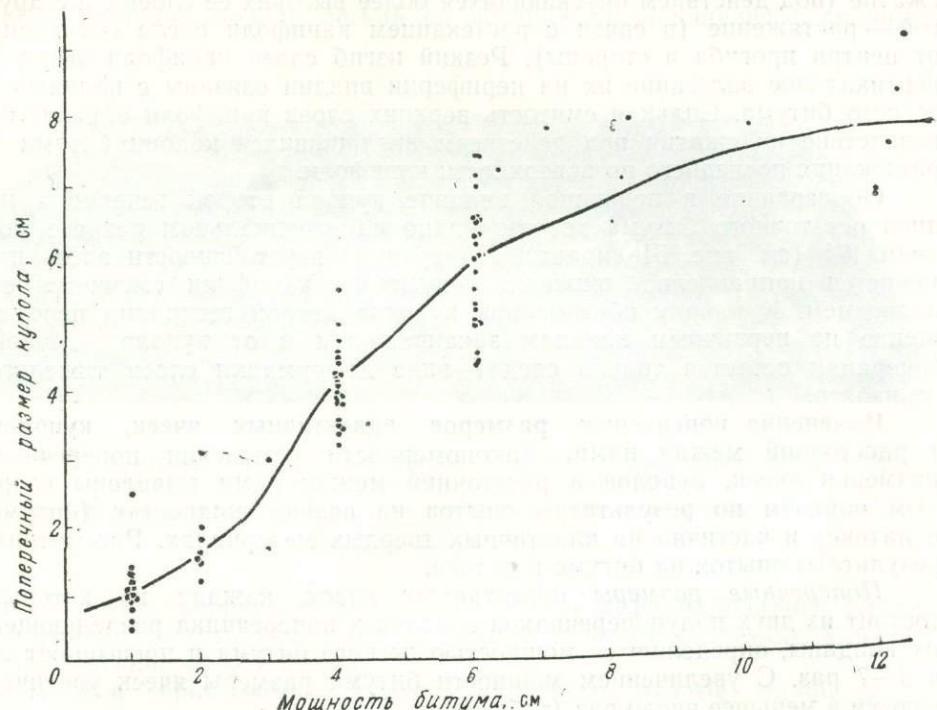


Рис. 60. Зависимость поперечных размеров куполов от мощности легкого битума.
По данным 77 опытов

мощность патоки была увеличена до 12 см, а остальные исходные данные остались без изменения. В этом случае были получены результаты, близкие к данным опытов с мощностью патоки в 6 см (см. табл. 4).

Таким образом, размер ячеек, по данным опытов, определяется мощностью легкой жидкости (битума) и не зависит от мощности тяжелой жидкости (патоки). Эта закономерность установлена в опытах на вязких жидкостях при мощности легкой жидкости меньшей, чем мощность тяжелой.

Проведенные опыты также показывают, что независимо от мощности патоки при увеличении мощности битума в пределах сосуда размером 20×20 см количество образующихся ячеек уменьшается, а размер их увеличивается. Так, при мощности битума 1 см образуется много мелких ячеек (см. рис. 30 и 31); при мощности битума 2 и 3 см ячеек меньше, но они крупнее, а при мощности битума 4 см и более одна ячейка не всегда полностью помещается в сосуде указанного размера (см. рис. 32 и 33). Высота адвективных ячеек зависит от стадии перемещения.

Поперечный размер купола примерно равен мощности легкого битума и не зависит от мощности тяжелой патоки. Первая зависимость хорошо фиксируется на графике, составленном по результатам 77 опытов (рис. 60) и по данным табл. 4.

При возрастании мощности битума отмечается сокращение количества куполов, сопровождаемое увеличением их поперечных размеров и изменением формы (см. рис. 34, III, 61—64). На площади сосуда 20×20 см при мощности битума от 1 до 3 см образуется группа

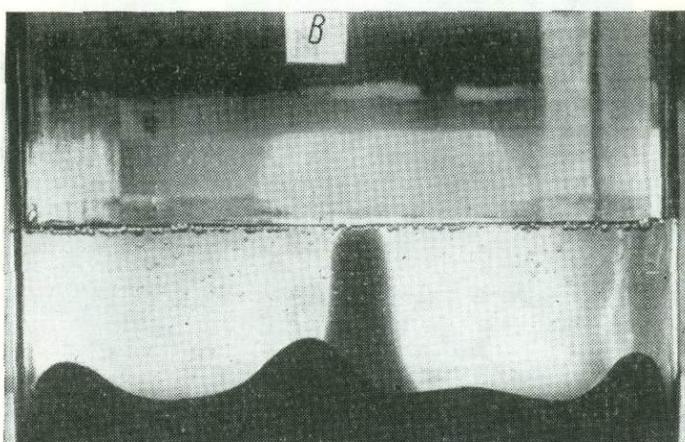


Рис. 61. Купол прорванного типа. Поперечный его размер 2 см. (Опыт 68, кадр 8, вид со стороны *B*)
Исходные данные: внизу — битум 2 см; вверху — патока 6 см

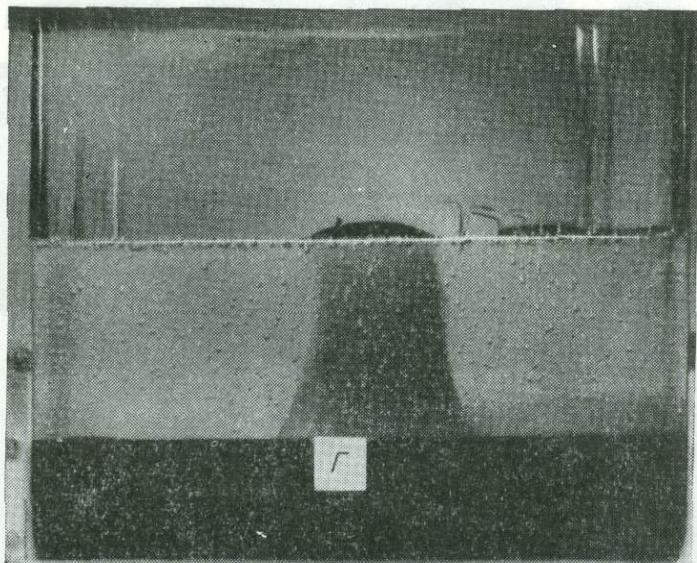


Рис. 62. Купол прорванного типа колоннообразной формы.
Поперечный размер его 4 см. (Опыт 35, кадр 31; вид со стороны боковой стенки сосуда *Г*)
Исходные данные: внизу — битум 4 см; вверху — патока 6 см

мелких куполов (рис. 65). При мощности битума 1 см количество их 16—25, при 3 см — два-три. При мощности битума 4 см и более на площади того же сосуда растет единичный купол, но большего размера (рис. 66). Таким образом, по количеству куполов на площади и по размеру их поперечников можно судить о первоначальной мощ-

ности легкой жидкости. Мощность тяжелой патоки почти не влияет на форму и количество куполов.

Расстояние между куполами, или межкупольное пространство, равно разности между размером ячейки и поперечником купола (см. табл. 4). При мощности битума 1 см независимо от мощности патоки

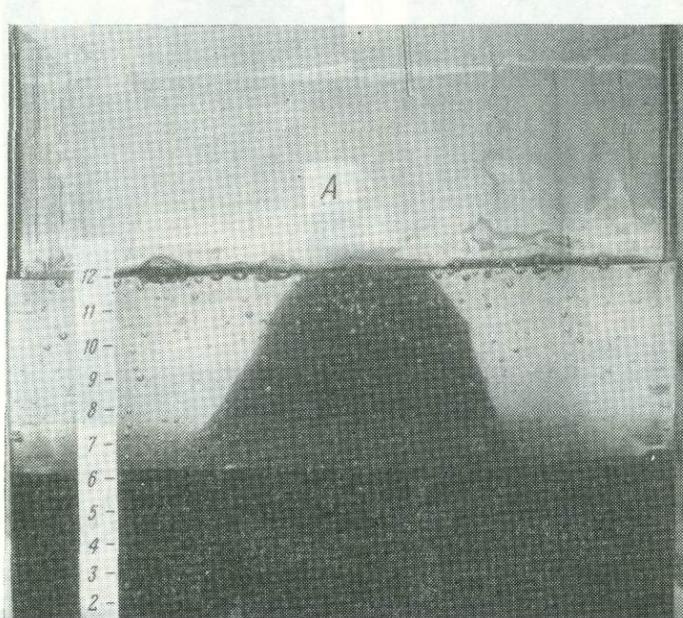


Рис. 63. Купол прорванного типа. Поперечный его размер 6 см.

(Опыт 76, кадр 6; вид со стороны А)
Исходные данные: внизу — битум 6 см, вверху — патока 6 см.

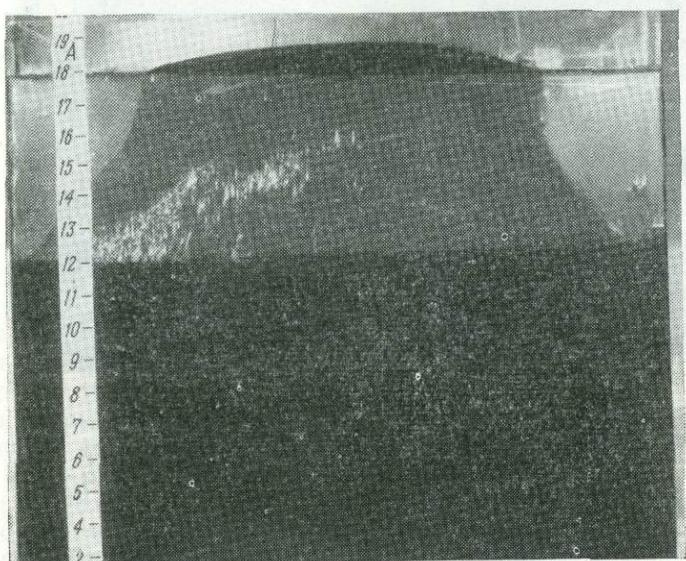


Рис. 64. Купол прорванного типа в виде пня. Поперечный размер его 12 см. (Опыт 83, кадр 35; вид со стороны А)
Исходные данные: внизу — битум 12 см; вверху — патока 6 см

(в опытах первой и второй серии) расстояние между куполами в 6 раз больше поперечника купола или мощности битума (опыты 50 и 36). При мощности битума 2 см (опыты 68, 77) оно равно 7,5 см, т. е.

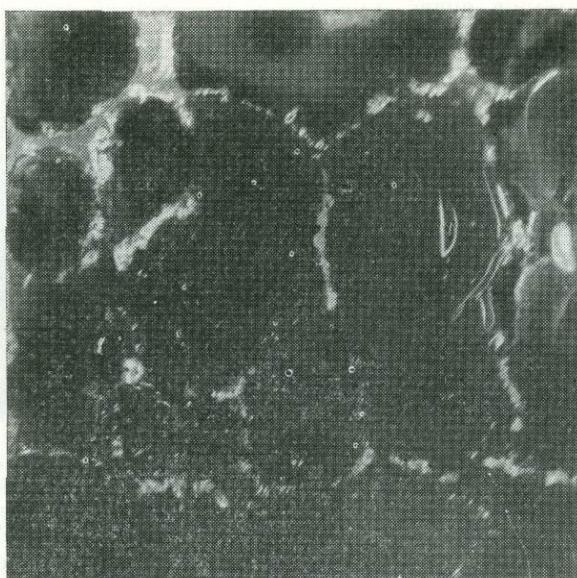


Рис. 65. Много мелких куполов прорванного типа.
(Опыт 50; вид сверху).

Исходные данные см. рис. 45

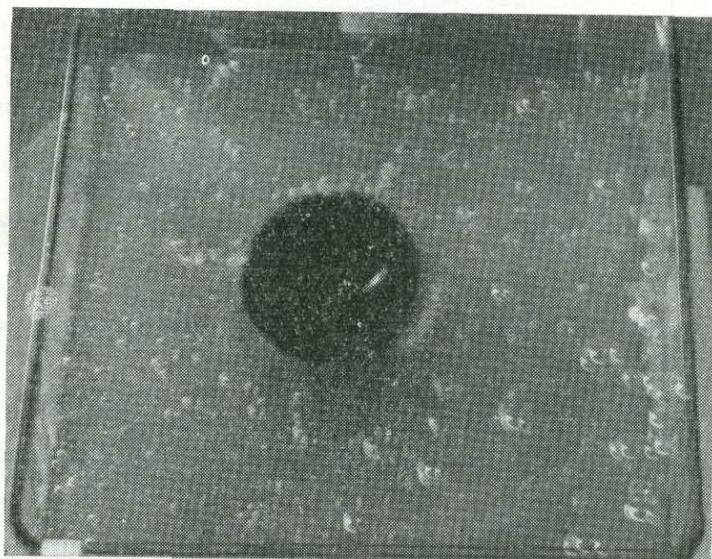


Рис. 66. Крупный купол прорванного типа. (Опыт 37, кадр 27;
вид сверху)

Исходные данные: внизу — битум 4 см; вверху — патока 12 см

почти в 4 раза больше поперечника купола. При мощности битума 4 см (опыты 38, 35 и 37) расстояние между куполами 8 см, т. е. в 2 раза больше поперечника купола. Наконец, при мощности битума 6 см (опыт 107) расстояние между куполами 8 см, только в 1,3 раза больше

поперечника купола. Дальше проследить эти изменения не удается, так как купол и межкупольное пространство полностью в сосуд не помещаются.

Рассмотренные на вязких жидкостях количественные изменения поперечных размеров ячеек, куполов и расстояний между ними показывают, что при малой мощности легкого слоя, в сравнении с тяже-

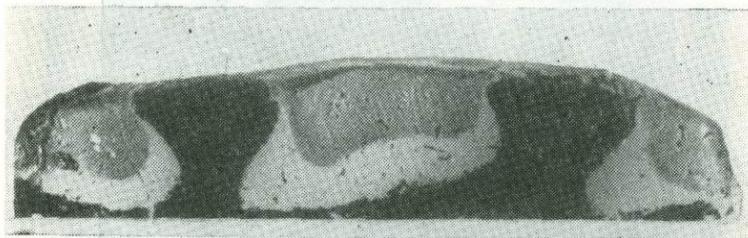


Рис. 67. Три неполные ячейки и два купола в начале третьей стадии перемещения. Купола небольшие слабо грибообразные. (Вертикальный разрез модели 13П)

Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — двухслойная замазка 16 мм, время вращения 1 мин 30 сек при 800 г

лым, образуются мелкие купола и ячейки, но в большом количестве. Купола в этом случае располагаются друг от друга на больших (относительно размера поперечника купола) расстояниях. С увеличением мощности легкого слоя (при сохранении большей мощности тяжелого слоя) поперечники куполов и ячеек увеличиваются, а расстояния между куполами (относительно размера поперечника купола) уменьшаются. При этом поперечные размеры куполов всегда примерно равны первоначальной мощности легкого слоя и не зависят от мощности тяжелого слоя. Увеличение поперечного размера ячейки, наблюдающееся с возрастанием мощности легкой жидкости, происходит в основном за счет увеличения поперечного размера купола и в меньшей степени вследствие увеличения размера межкупольного пространства.

В опытах на пластичных материалах изучали влияние мощности слоя в одной серии — легкого каучука, а в другой — тяжелой замазки на количественные изменения поперечных размеров ячеек, куполов и расстояний между ними.

Таблица 5
Влияние мощности легкого каучука на размеры и количество куполов и ячеек

Мощность каучука, мм	Величина центробежной силы, г	Время перемещения, мин	Количество		Размеры куполов и ячеек	Номер модели
			неполных ячеек	купов		
2	800	18	3	2	Мелкие	8П
4	800	1,5	3	2	»	13П
6	800	1,5	2	1	Крупные	16П
6	800	1	2	1	»	14П
8	—	1	2	1	»	4П
8	500	2,5	2	1	»	5Н

Рассмотрим сначала влияние мощности легкого каучука (табл. 5). В одной части опытов этой серии увеличивающаяся мощность слоя легкого каучука меньше мощности тяжелой замазки. Последняя была постоянной и равной 16 мм. Поперечники куполов и ячеек замеряли

в вертикальных разрезах моделей к началу третьей стадии перемещения. Из табл. 5 и на вертикальном разрезе модели 13П (рис. 67) видно, что при мощности легкого каучука 2—4 мм наблюдаются три неполные небольшие ячейки и два небольших купола. При мощности каучука 6 и 8 мм в таких же разрезах моделей 16П и 5П наблюдаются по две неполные ячейки и одному более крупному куполу.



Рис. 68. Две неполные ячейки и один купол в начале третьей стадии перемещения. Купол крупный. (Вертикальный разрез модели 16П)
Исходные данные: внизу — каучук 6 мм, вверху — трехслойная замазка 16 мм.
время вращения 1 мин 30 сек при 800 g



Рис. 69. Две неполные ячейки и один купол в начале третьей стадии перемещения. Купол крупный. В своде колоннообразного купола — мульда, напоминающая вдавленные мульды соляных куполов (Вертикальный разрез модели 5П)
Исходные данные: внизу — каучук 8 мм, вверху — замазка 16 мм, время вращения 2 мин 30 сек при 500 g

(рис. 68 и 69). Таким образом, с увеличением мощности слоя легкого каучука купола и ячейки становятся крупнее, но количество их уменьшается.

Результаты опытов на пластичных материалах (каучуке и замазке) в отношении влияния мощности легкого слоя на количественные закономерности изменения размеров ячеек и куполов подтверждают данные, полученные при исследовании на вязких жидкостях. Такие закономерности отмечаются до тех пор, пока мощность слоя каучука меньше мощности слоя замазки, т. е. характерны для адвективных структур центрального проседания (см. рис. 53, А, Б).

В другой части опытов этой серии при равенстве мощности каучука и замазки поперечные размеры куполов и впадин одинаковы и равны мощности каучука и замазки (см. рис. 54, А, Б). Если мощность слоя легкого каучука больше мощности слоя замазки, поперечные размеры куполов также равны первоначальной мощности каучука. Небольшая мощность замазки в этом случае ограничивает поперечные размеры ячеек, что при больших размерах куполов приводит к образованию узких впадин, т. е. к возникновению адвективных структур краевого проседания (см. рис. 56, А, Б).

Мощность слоя тяжелой замазки не влияет на размеры ячеек, куполов и впадин, что видно из табл. 6 и на вертикальных разрезах моделей 89, 91 и 93 (рис. 70—72). В этих моделях мощность слоя каучука 4 мм, а слоя замазки увеличивается от 4 до 32 мм. На

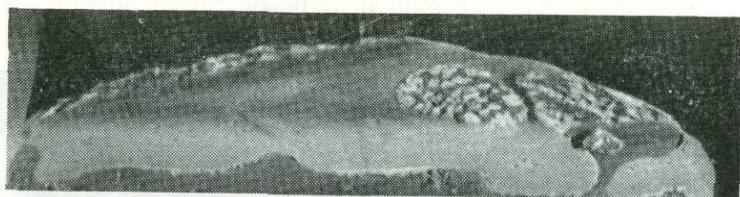


Рис. 70. Три небольшие ячейки (четыре мелких купола). В основном вторая стадия перемещения. (Вертикальный разрез модели 89)

Исходные данные: внизу — каучук 4 мм, вверху — замазка 4 мм, время вращения 9 мин при 300 g

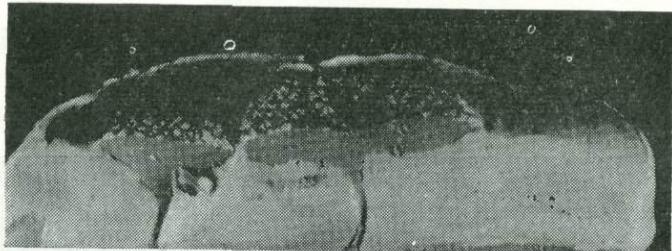


Рис. 71. Три небольшие ячейки (четыре мелких купола). В основном третья стадия перемещения. (Вертикальный разрез модели 91)

Исходные данные см. рис. 70, только мощность замазки 16 мм



Рис. 72. Три небольшие ячейки (четыре мелких купола). Четвертая стадия перемещения. (Вертикальный разрез модели 93)

Исходные данные те же, что на моделях 89 и 91, только мощность замазки 32 мм (см. рис. 70)

фотографиях в вертикальных разрезах указанных моделей видно, что при различных величинах мощности замазки образуется одинаковое количество небольших куполов, которые расположены на расстояниях больших, чем поперечный размер купола. Такое расположение куполов отвечает варианту, при котором мощность слоя легкого каучука

Таблица 6

Влияние мощности тяжелой замазки на стадии развития гравитационной неустойчивости

Мощность слоя тяжелой замазки, мм	Стадия перемещения	Номер модели
4	В основном вторая, но 2 купола вышли на поверхность замазки	89
8	В основном вторая, но 3 купола вышли на поверхность замазки	90
16	Третья	91
32	Четвертая	93
64	Перемещение отсутствует	94

При мечание. Мощность слоя легкого каучука 4 мм; g центрифуги 300; время вращения 9 мин; везде образуются 3 небольших ячейки и 4 мелких куполов; размер впадин больше, чем размер поперечников куполов.

меньше слоя тяжелой замазки, т. е. обусловлено небольшой мощностью легкого слоя. Влияние увеличения мощности тяжелой замазки в рассматриваемых моделях сказывается только на стадии перемещения (табл. 6), а размеры куполов и величины расстояний между ними охраняются неизменными. Таким образом, мощность легкого каучука и тяжелой замазки на количественные закономерности оказывает такое же влияние, какое наблюдалось на вязких жидкостях.

Основные результаты тех и других экспериментов сводятся к следующему. При малой мощности легкого слоя по сравнению с тяжелым мелкие купола, размеры которых равны мощности слоя легкого материала, сочетаются с широкими впадинами. При мощности легкого слоя, равном мощности тяжелого, размеры поперечников куполов и впадин равны между собой и равны мощности этих слоев. При мощности легкого слоя, большей чем мощность тяжелого, крупные купола (размеры которых также равны мощности легкого слоя) расположены на расстояниях, меньших, чем размеры поперечников куполов. В этом случае небольшая мощность тяжелого слоя ограничивает размеры ячеек и расстояний между куполами и приводит как бы к зеркальному обращению форм куполов и впадин, возникающих на границе неустойчивости. В первом случае малые купола расположены на больших расстояниях, а в третьем — крупные купола на близких расстояниях.

Итак, мощность слоя легкого материала определяет не только тип сочетания структур в адвективных ячейках, но и размеры этих структур. На размеры структур адвективных ячеек краевого проседания (крупных куполов и узких впадин), образующихся при меньшей мощности тяжелого слоя, чем мощность легкого слоя, некоторое влияние оказывает и мощность слоя тяжелого материала.

Морфология куполов первой и второй генерации. Форма куполов первой и второй генерации, как и их размеры, определяются мощностью слоя легкого материала и зависят от стадии развития неустойчивости. Форма куполов первой генерации зависит также от их положения в пределах кольцевых массивов.

В зависимости от положения куполов первой генерации в кольцевых массивах выделяются крупные купола звездчатой формы и простые, более мелкие купола (см. рис. 20). Крупные купола звездчатой формы расположены на пересечении колец, чем и объясняется их форма. Эти купола, видимо, развивались на основе первых доминирующих неровностей границы неустойчивости. Развитие первых неровностей могло предопределять расположение самих кольцевых массивов. Основной формой кольцевых массивов являются простые купола,

которые при соединении их перемычками образуют валиобразные поднятия (см. рис. 28).

Рассмотрим изменение формы простых куполов в зависимости от мощности слоя легкого материала и стадии развития неустойчивости.

При небольшой мощности слоя легкой жидкости, равной 1—3 см, мелкие купола в начале роста имеют конусообразную форму, а затем становятся колоннообразными (см. рис. 34, III и 64). После достижения куполом поверхности тяжелого слоя в средней части колонны происходит уменьшение ее поперечного сечения, а вверху и внизу расширение (см. рис. 29, 30). Расширение вверху обусловлено растеканием поднимающейся легкой жидкости по поверхности тяжелой, а внизу связано с тем, что для поддерживания роста купола легкая жидкость собирается с большой площади. Затем на отдельных участках наблюдается утонение колонны купола, сопровождающееся пережимами, а иногда и разрывами ее и, наконец, образование четкообразной полосы на месте колонны (см. рис. 34, V и 45).

При мощности легкой жидкости от 4 до 10—12 см более крупные купола вначале имеют округлую, куполообразную форму (см. рис. 37), а затем приобретают колоннообразную (см. рис. 39, 62). В дальнейшем в головной части колонны купола происходит растекание легкого материала по поверхности тяжелого и он приобретает грибообразную форму (см. рис. 41) или форму козырька (см. рис. 42). С течением времени шляпка у этих куполов увеличивается, а поперечник купола утоняется (см. рис. 22). Иногда наблюдается пережим купола у его основания и тогда купол имеет вид перевернутой капли (см. рис. 49, 50).

Наконец, при мощности битума 10—12 см при достижении куполом поверхности слоя тяжелого материала у него не образуются карнизы, поперечник его большой и имеет вид пня (см. рис. 64).

Мощность тяжелого слоя почти не влияет на форму куполов. При увеличении мощности тяжелой патоки или замазки чаще наблюдаются только каплевидные расширения в верхней головной части купола (см. рис. 47).

Форма куполов второй генерации определяется величиной остаточной мощности легкого слоя, обычно небольшой, поэтому эти купола напоминают по форме мелкие купола первой генерации. Для них характерны каплевидные расширения вверху (см. рис. 50, 52) и они редко поднимаются до поверхности тяжелого слоя. В некоторых случаях они даже не являются куполовидными поднятиями и не имеют ядра, а представляют собой плоские широкие глубокопогруженные поднятия, образовавшиеся в результате опускания нижних слоев тяжелого горизонта над вторичными компенсационными мульдами. Поднятия второй генерации такой формы как бы повторяют форму остаточной линзы легкого материала в первичной впадине (см. рис. 47, 48).

Закономерности изменения скорости процесса перемещения материала. Для изучения влияния мощности и вязкости слоев легкого и тяжелого материала, а также разности их плотности на рост куполов и весь процесс перемещения было проведено несколько серий опытов в основном на вязких жидкостях; на пластичных материалах рассматривалось только влияние мощности слоя легкого каучука и тяжелой замазки.

Влияние мощности легкого битума наблюдалось в ряде опытов при различной мощности тяжелой патоки: 4; 6; 10 и 12 см и при вязкости патоки $1,4 \cdot 10^3$ — $3,2 \cdot 10^3$ пуаз — П и 55%-ного битума $2,4 \times 10^5$ — $1,2 \cdot 10^6$ пуаз — П. Во всех случаях увеличение мощности битума от 1 до 3, 4, 6, 8 и 12 см приводило к ускорению появления после начала опыта на поверхности битума первой заметной неровности

(купола), а затем последующих куполов; к увеличению скорости роста стдельных куполов и к убыстрению всего процесса перемещения патоки вниз, а битума вверх.

На графике, построенном по данным опытов для различных значений мощности патоки (рис. 73), видно, что с увеличением мощности битума сокращается время до появления первой неровности на поверхности битума, уменьшается продолжительность роста первого ку-

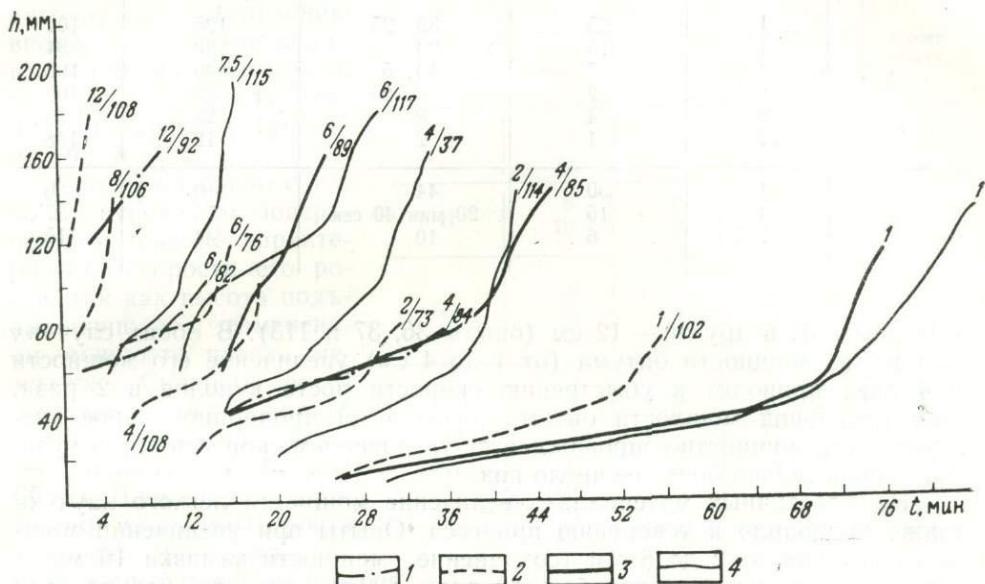


Рис. 73. График зависимости начала и скорости роста первого купола от мощности легкой жидкости (битума), по данным опытов

1—4 — кривые скорости роста купола при мощности патоки (тяжелой жидкости) соответственно 4, 6, 10 и 12 см. Числы у кривых: числитель — мощность битума, знаменатель — номер опыта. Вязкость тяжелой жидкости (патоки) $1,4 \cdot 10^5$ — $3,2 \cdot 10^5$ пуз — П, легкой жидкости (битума) $2,4 \cdot 10^5$ — $1,2 \cdot 10^6$ пуз — П; плотность патоки $1,42 \text{ г}/\text{см}^3$, битума $0,97$ — $1,004 \text{ г}/\text{см}^3$

пала (кривая роста купола становится более крутой), изменяется темп роста купола. При большой мощности битума 8 и 12 см купол растет равномерно и быстро.

С уменьшением мощности битума до 6, 4, 3, 2 и 1 см рост купола в разных участках кривой происходит с разной скоростью, но в общем медленнее. Так, в опыте 76 при мощности битума и патоки 6 см скорость роста купола изменяется следующим образом: 1) сразу после появления первых неровностей на поверхности битума скорость роста купола относительно большая — 7 мм/мин в течение первых 2 мин (кривая скорости роста крутая); 2) затем наблюдается замедление роста — 1,5 мм/мин в течение 6 мин (кривая скорости роста отлогая); 3) далее снова убывает скорость роста купола — 11 мм/мин в течение 2,5 мин (кривая скорости роста крутая); 4) потом после небольшого замедления следует резкое увеличение скорости роста до 16 мм/мин в течение 30 сек, сопровождающееся прорывом поверхности патоки; 5) далее купол растет над поверхностью патоки со скоростью 11 мм/мин. Максимальное превышение купола над поверхностью патоки 17 мм наблюдается через 1 мин 30 сек после прорыва. После этого головная часть купола начинает растекаться по поверхности патоки и через 10 мин его высота над ее поверхностью уменьшается до 10 мм.

В табл. 7 сведены результаты опытов с изменяющейся мощностью битума при мощности патоки в одной серии опытов 6 см (шесть пер-

Таблица 7

Влияние мощности легкого битума на начало и продолжительность роста (скорость роста) первого купола до поверхности патоки

Серии опытов	Мощность битума, см	Время появления первой неровности на поверхности битума, мин	Продолжительность роста (скорость роста) первого купола до поверхности патоки, мин	Продолжительность процесса перетекания битума кверху, мин	Номер опыта
I	1	25	30, 25	125	102
	1	15	23	120	34
	4	7	13, 5	40	103
	8	2	3, 25	20	109
	8	4	9	27	88
	12	1	2	12	108
II	1	30	44	310	36
	4	15	20 мин 40 сек	75	37
	7,5	6	10	44	115

вых опытов), в другой — 12 см (опыты 36, 37 и 115). В обоих случаях при малой мощности битума (от 1 до 4 см) увеличение его мощности в 4 раза приводит к убыстрению скорости роста куполов в 2 раза. При начальной мощности битума более 4 см пропорциональное увеличение его мощности сопровождается увеличением скорости роста куполов в значительно большее число раз.

На пластичных материалах увеличение мощности легкого каучука также приводило к ускорению процесса. Опыты при увеличении мощности каучука от 2 до 8 мм (сохранение мощности замазки 16 мм и постоянной величине центробежной силы 800g) показали, что для получения третьей стадии неустойчивости при малой мощности каучука требуется большее время (18 мин), чем при большей его мощности (1 мин). При увеличении мощности легкого каучука быстрее происходит процесс его перемещения кверху (см. табл. 5).

Таблица 8

Влияние мощности тяжелой патоки на время появления неровностей первого купола и продолжительность его роста до поверхности патоки

Серия опытов	Мощность, см		Время появления неровности первого купола на поверхности битума, мин	Продолжительность роста первого купола до поверхности патоки, мин	Продолжительность процесса перетекания битума кверху, мин	Номер опыта
	патоки	битума				
I	4	1	10	22	102	79
	6	1	15	23	120	34
	10	1	25	50	—	90
	12	1	30	44	310	36
III	6	4	7	13,5	40	103
	8	4	2	13	70	86
	12	4	15	20 мин 40 сек	75	37
IV	4	6	2	4	19	81
	8	6	3	13	25	87
	12	6	20	8,5	45	78
V	6	8	4	9	27	88
	12	8	6	10,5	44	115

Влияние мощности тяжелого материала наблюдалось в пяти сериях опытов при разной мощности 55%-ного битума, равной 1, 2, 4, 6 и 8 см. Во всех случаях увеличение мощности патоки приводило к увеличению времени появления первой неровности (купола); к замедлению его роста до поверхности тяжелой патоки; к увеличению времени перемещения всего битума вверх, но к ускоренному росту отдельных куполов (рис. 74 и табл. 8 и 9).

Продолжительность роста купола до поверхности патоки не характеризует скорости его роста, так как высота подъема купола с изменением мощности патоки меняется. Скорость роста купола определялась средним временем подъема купола на 40 или 60 мм. Влияние мощности патоки на скорость роста куполов при различной мощности битума разное (см. рис. 74 и табл. 9). Увеличение мощности тяжелой патоки при мощности битума 1 и 2 см приводит к незначительному уменьшению скорости роста куполов, а при мощности битума 4 и 6 см — к ускорению их роста. В последних случаях увеличение мощности патоки в 3 раза дает ускорение роста куполов в 2—3 раза.

Таблица 9
Влияние мощности тяжелой патоки на скорость подъема куполов при разной мощности легкого битума

Серия опытов	Мощность, см		Время подъема купола на 40 мм, мин	Номер опыта
	патоки	битума		
I	4	1	22	79
	12	1	26	36
II	6	2	27	73
	12	2	29	74
III	4	4	22	84
	6	4	16	35
	12	4	14,75	37
IV	4	6	13	82
	6	6	12	76
	8	6	11	110
	8	6	9	87
	10	6	10	116
	10	6	4	89
	12	6	4	78

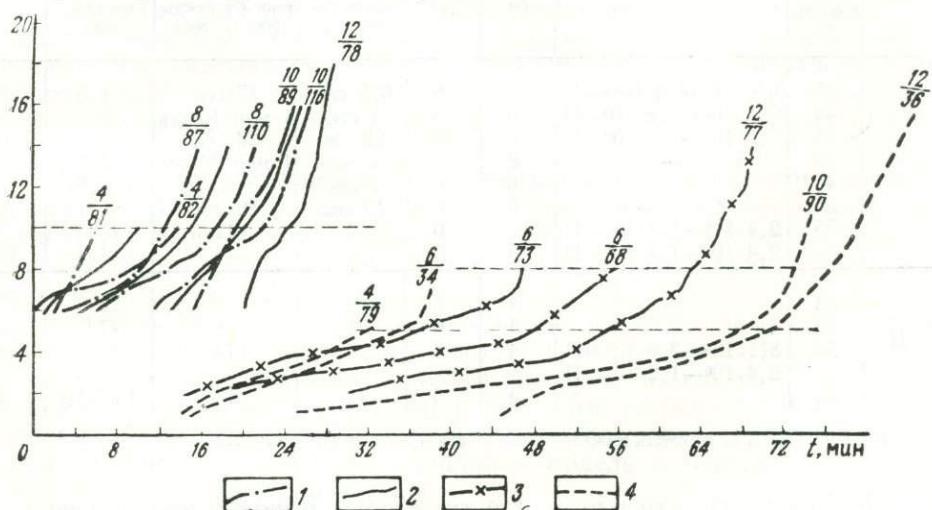


Рис. 74. График зависимости начала и скорости роста первого купола от мощности тяжелой жидкости (патоки), по данным опытов
1 — кривые скорости роста купола при мощности битума 6 см; 2 — среднее значение по данным двух опытов; 3 и 4 — кривые скорости роста купола при мощности битума соответственно 2 и 1 см. Число у кривых: числитель — мощность патоки в см, знаменатель — номер опыта. Скорость роста определяется временем подъема купола на 40 мм (горизонтальный пунктир) при мощности битума 1 и 6 см и на 60 мм при мощности битума 2 см.
Вязкость и плотность патоки и битума см. рис. 73.

Если сравнить эти данные с влиянием на рост купола мощности битума (см. табл. 7), то видно, что влияние мощности битума более активное.

В опытах на пластичных материалах при увеличении мощности слоя тяжелой замазки также наблюдалось ускорение процесса перемещения, проявившееся в более зрелых его стадиях. При мощности замазки 4 мм перемещение отвечает второй стадии, при мощности замазки 16 мм наблюдается третья стадия неустойчивости, а при мощности замазки 32 м — четвертая стадия (см. табл. 6). В этой закономерности имеются, видимо, ограничения, так как в модели 94 при увеличении мощности замазки до 64 мм, т. е. в 16 раз по отношению к мощности легкого каучука, перемещения вообще не наблюдалось.

Установленные закономерности скорости роста куполов подтверждаются и с физической точки зрения. Е. В. Артюшков (1963а, б; 1964) отмечает, что скорость роста возмущений на границе неустойчивости в грунтах зависит от длины волны, которая определяется мощностью слоев. Длина волны увеличивается пропорционально увеличению мощности и сопровождается увеличением скорости процесса.

Влияние вязкости легкого материала на скорость роста куполов исследовалось только в опытах с битумом и патокой. Проведены были две серии опытов, в одной из которых мощность битума и патоки равна по 6 см, а в другой мощность битума 4 см, патоки 6 см. Результаты опытов, сведенные в табл. 10 и на графике (рис. 75), показывают, что скорость роста куполов и время их появления с увеличением вязкости легкого битума уменьшаются.

Таблица 10

Влияние вязкости легкого битума на время появления первой неровности на поверхности битума и на скорость роста куполов

Серия опытов	Легкий битум			Мощность тяжелой патоки, см	Время появления первой неровности на поверхности битума, мин	Продолжительность роста первого купола до поверхности патоки (скорость роста), мин	Продолжительность процесса перетекания битума кверху, мин	Номер опыта
	Содержание в смеси с ингромолом, %	Вязкость, пуз	Мощность, см					
I	35	$3,5 \cdot 10^2$ ($4,4 \cdot 10^2$)—В	6	6	0,5 сек	17 сек	1,5	97
	40	$7,5 \cdot 10^2$ — $1,8 \cdot 10^3$ —П	6	6	1 сек	1 мин 16 сек	3	94
	40	$7,5 \cdot 10^2$ — $1,8 \cdot 10^3$ —П	6	6	20 сек	38 сек	4	100
	45	—	6	6	1 сек	1 мин 30 сек	3	95
	45	—	6	6	1 сек	37 сек	2,5	99
	50	$2,5 \cdot 10^3$ —В	6	6	45 сек	29 сек	5	98
	55	$2,4 \cdot 10^5$ — $1,2 \cdot 10^6$ —П	6	6	4	11	45	76
	55	$2,4 \cdot 10^5$ — $1,2 \cdot 10^6$ —П	6	6	7	14	4,5	104
II	52	—	4	6	2	7	25	40
	53	—	4	6	1	8	27	42
	54	$8,1 \cdot 10^4$ — $3,9 \cdot 10^5$ —П	4	6	3	14	37	38
	55	$2,4 \cdot 10^5$ — $1,2 \cdot 10^6$ —П	4	6	10	18	1 ч 10 м	35

Примечание. Вязкость тяжелой патоки $1,4 \cdot 10^3$ — $3,2 \cdot 10^3$ пуз—П.

Влияние разности плотностей тяжелой и легкой жидкостей на рост куполов. С увеличением разности плотности тяжелой и легкой жидкостей рост куполов убывает. Это происходит как при увеличении плотности тяжелой жидкости, так и при уменьшении плотности легкой (табл. 11).

Влияние плотности слоя тяжелой жидкости на рост куполов наблюдалось в трех опытах при одинаковой мощности тяжелой и легкой жид-

костей, равной 4 см. Легкой жидкостью в опытах был 55%-ный битум. В качестве тяжелой жидкости использовались попеременно этилцеллюлоза, патока II сорта и жидкое стекло. Все эти тяжелые жидкости имели примерно одинаковую вязкость. Из данных табл. 11 видно, что увеличение плотности тяжелой жидкости, сопровождающееся увеличением разности плотностей тяжелой и легкой жидкостей, приводит к убыстрению появления неровностей куполов на поверхности битума и к сокращению продолжительности роста куполов и процесса перетекания битума вверху.

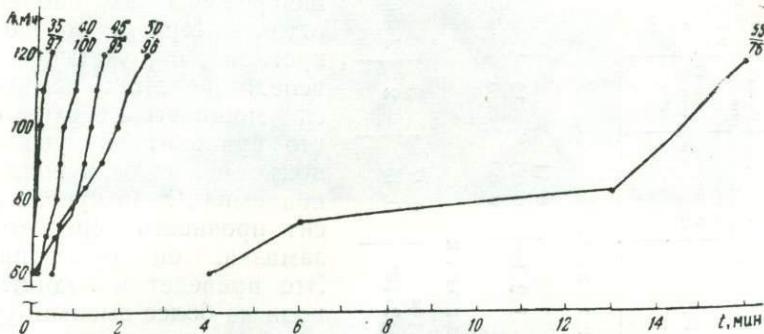


Рис. 75. График зависимости начала и скорости роста первого купола от вязкости легкой жидкости (битума). Цифры у кривых: числитель — вязкость легкой жидкости (битума) в %, знаменатель — номер опыта

Вязкость 35%-ного битума $3,5 \cdot 10^2$ (4,4 · 10^2) пуз.; 40%-ного битума $7,5 \cdot 10^2$ — $1,8 \cdot 10^3$ пуз.; 45%-ного битума менее $2,5 \cdot 10^3$ — В; 50%-ного битума $2,5 \cdot 10^3$ пуз.— В; 55%-ного битума $2,4 \cdot 10^3$ — $1,2 \cdot 10^4$ пуз.— П; плотность битума 0,97—1,064 г/см³ и мощность 6 см. Вязкость тяжелой жидкости (патоки) $1,4 \cdot 10^3$ — $-3,2 \cdot 10^3$ пуз.— П; плотность 1,42 г/см³ и мощность 6 см

Влияние плотности слоя легкой жидкости наблюдалось в ряде опытов при мощности легкой жидкости 8 см и мощности тяжелой жидкости 6 см. Тяжелой жидкостью в этих опытах была патока I сорта. В качестве легкой жидкости брались попеременно: 50%-ный битум, смешанный с каолиновой глиной, и 55%-ный битум. С уменьшением плотности легкой жидкости (с 1,15 до 0,97 г/см³) при равенстве других исходных условий увеличивалась разность плотностей между тяжелой и легкой жидкостями, что сказывалось в более быстром появлении неровностей на поверхности битума, более быстром росте куполов и в ускорении процесса перетекания легкой жидкости вверх, а тяжелой вниз (см. табл. 11).

Процесс роста куполов в слоях замазки разной прочности и вязкости. Модель 119 имитировала процесс роста соляных куполов в слоистых осадочных породах и астенолитов в слоистой верхней части мантии (рис. 76). При этом выяснялась роль слоев разной прочности и вязкости на процесс их роста.

Тяжелая замазка общей мощностью 15 мм состояла из трех слоев разной прочности и вязкости по 5 мм толщины каждый. Замазка среднего слоя имела большую прочность и вязкость, так как после приготовления выдерживалась одни сутки и при этом застывала. Замазка для нижнего и верхнего слоев использовалась свежеприготовленной, прочность и вязкость ее меньше. Созданная модель в течение 3 мин вращалась в центрифуге при 300 д.

На вертикальных разрезах модели (см. рис. 76, А) видно, что после деформации с границы неустойчивости каучука и замазки поднимается много мелких куполов, большей частью скрытопрорванного типа. Средний слой замазки определяет основной уровень их подъема. Это можно объяснить тем, что подъемная сила основной части куполов меньше прочности этого слоя. Более крупные купола стремятся прорвать этот

Таблица 11

Влияние разности плотностей тяжелой и легкой жидкостей на скорость роста куполов

Название	Тяжелая жидкость			Легкая жидкость			Разность плотностей тяжелой и легкой жидкости, г/см ³	Время погружения первого купола до поверхности тяжелой жидкости, мин	Продолжительность процесса перетекания битумка, мин	Номер опыта
	Мощность, см	Плотность, г/см ³	Вязкость—П, пуз	Название	Мощность, см	Плотность, г/см ³				
А. Увеличение плотности тяжелой жидкости										
Этилцеллюлоза	4	1,08	10 ² —10 ³	Битум 55%-ный	4	0,97	2,4·10 ⁵ —1,2·10 ⁶	0,11	22	63
Патока II сорта	4	1,42		То же	4	0,97		0,45	20	45
Жидкое стекло	4	1,6		»	4	0,97		0,63	12	25
Б. Уменьшение плотности легкой жидкости										
Патока I сорта	6	1,42	1,4·10 ³ —3·2·10 ³	Битум 50%-ный	8	1,15	~10 ⁶	0,27	5	129
То же	6	1,42	1,10 ³ —3·2·10 ³	с глиной	8	0,97	2·4·10 ⁵ —1,2·10 ⁶	0,45	2	2 мин 55 сек
				Битум 55%-ный					40	106

слой (см. рис. 76, б). В тех случаях, когда это усилие меньше прочности указанного среднего слоя замазки, над куполом в слоях замазки образуется антиклинальный изгиб. В сводовой части купола в менее прочном верхнем слое замазки, расположеннем выше среднего слоя, наблюдается отток материала со свода, а в прогибах, окружающих купол, вследствие этого увеличивается мощность верхнего слоя, что приводит к увеличению подъемной силы купола. Если подъемная сила купола превысит прочность среднего слоя замазки, он будет прорван. Это приведет к поднятию купола на более высокий уровень и даже к выходу его на поверхность замазки, т. е. к образованию купола прорванного типа.

Таким образом, наличие более прочных (более вязких) прослоев в разрезе осадочных пород, перекрывающих соль, может привести к образованию куполов скрытопрорванного типа, формирование которых было обусловлено не характером самого процесса перемещения, а задержкой его на определенных уровнях.

Влияние повторных этапов роста куполов на их форму и распределение. В специальной серии опытов на твердых пластичных материалах изучалось влияние на форму и распределение куполов повторных этапов их роста, следовавших за перерывами в осадконакоплении и происходивших при возрастании мощности тяжелого горизонта.

Опыты ставились следующим образом. Первоначально приготавливались три модели с одинаковой мощностью каучука (по 4 или 6 мм) и замазки по 8 мм. Эти модели в течение одинакового времени вращались в центрифуге при 300 д. Продолжительность первого вращения в разных

опытах составляла от 3 до 12 мин и определяла первый этап роста купола. Разрез одной из таких моделей виден на рис. 77. Затем в две другие модели добавлялось по 8 мм замазки и они подвергались повторному вращению. Продолжительность второго вращения была от нескольких десятков секунд до 9 мин при 300 d . После этого в разрезе одной

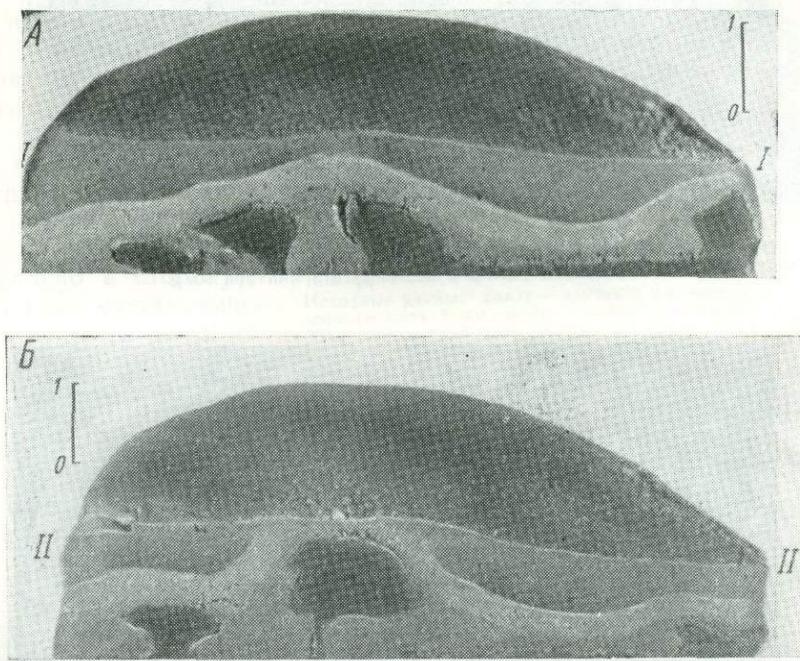


Рис. 76. Процесс роста куполов в слоях замазки разной прочности и вязкости. (Вертикальные разрезы модели 119; A — в периферийной и B — в центральной части)

Исходные данные: внизу — легкий каучук, 4 см, вверху — тяжелая трехслойная замазка 15 мм (мощность каждого слоя 5 мм). Средний слой (самый светлый на фото) имеет большую прочность и вязкость

из этих двух моделей можно было видеть результат действия двух этапов роста, связанных как бы с двумя перерывами и следующим за ними накоплением осадочных толщ (рис. 78). Наконец, в третью модель добавлялось еще 16 мм замазки и она снова подвергалась вращению в течение времени от 15 сек до 9 мин при 300 g . Разрез последней модели дает картину перемещения после трех этапов роста (рис. 79).

Было проведено несколько таких комбинированных опытов, в которых в результате первого вращения (первого этапа роста) были получены купола колоннообразной или грибообразной формы. Затем проводились наблюдения над изменением их формы и характера распределения при повторных этапах роста. При повторных этапах роста перемещение каучука вверх происходит по старым каналам, т. е. перераспределения в расположении куполов не наблюдается.

Рассмотрим характер изменения формы куполов при повторных этапах роста. Купола колоннообразной формы, образованные в процессе перемещения каучука вверх (после наложения первого слоя замазки), при повторном росте (после наложения второго слоя замазки) проникают в этот второй слой всей колонной (рис. 80). По колоннообразной форме купола нельзя решить, образовался ли он в результате двух или одного этапа роста. Форма купола, представленная на рис. 80, могла получиться и в результате однократного перемещения.

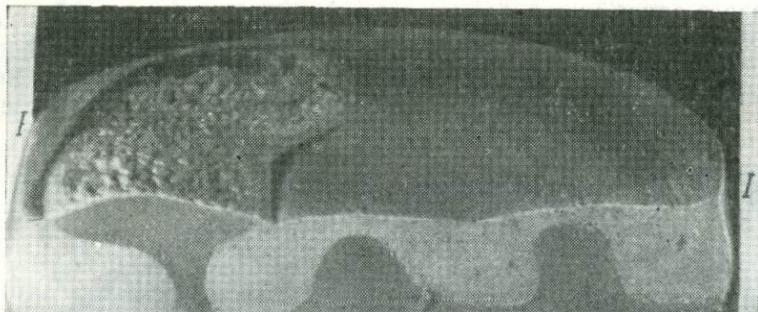


Рис. 77. Купола колоннообразного (справа) и грибообразного (слева) вида после одного этапа роста. (Вертикальный разрез модели 99)

Исходные данные: внизу — каучук 6 мм, вверху — замазка 8 мм, время вращения модели в центрифуге 3 мин при 300 g

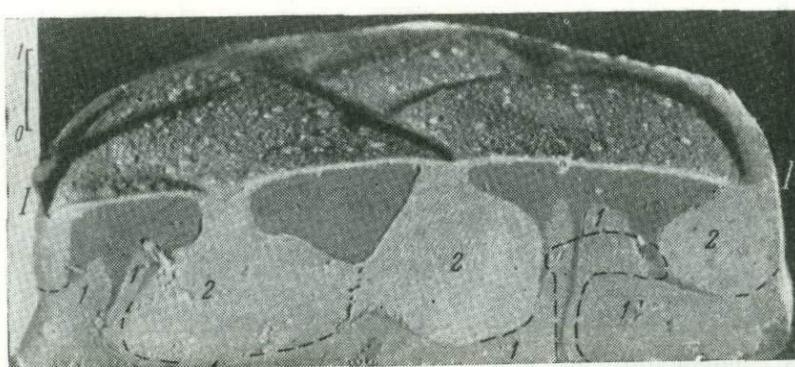


Рис. 78. Купола с двумя этажами навесов (карнизов) после двух этапов их роста. Пунктиром (справа) показано положение грибообразного купола после первого этапа. (Вертикальный разрез модели 100 по линии I-I)

Исходные данные: внизу — каучук 6 мм, вверху — замазка первого слоя — 8 мм, время первого вращения 3 мин при 300 g; добавлен второй слой замазки 8 мм, время второго вращения 1 мин при 300 g

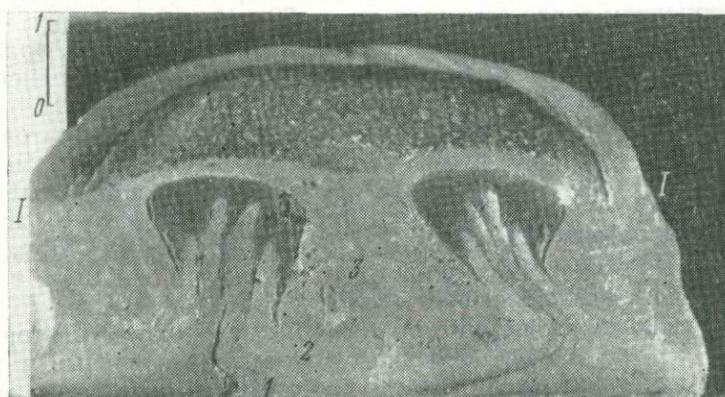


Рис. 79. Грибообразные купола после трех этапов их роста. (Вертикальный разрез модели 102)

Исходные данные: внизу — каучук 6 мм; вверху — замазка первого слоя 8 мм; время первого вращения 3 мин при 300 g; после добавлен второй слой замазки 8 мм, время второго вращения 1 мин при 300 g; добавлен третий слой замазки 16 мм, время третьего вращения 15 сек при 300 g

Если после первого этапа роста купол приобретает грибообразную форму, его карнизы располагаются на уровне поверхности первого перерыва, т. е. в кровле первого слоя замазки (см. рис. 78, показано пунктиром; и рис. 81). При повторном росте, связанном с наложением второго слоя замазки, подъемная сила купола увеличивается. Опускание во впадины второго слоя замазки приводит к отжиманию нижнего ее слоя в боковые стороны и вверх под шляпку купола. Это способствует более интенсивному проникновению головной части купола (непосредственно вблизи канала) во второй слой замазки.

Несколько в сторону от канала купола отжимающее действие нижнего слоя замазки вверх под карнизы куполов ослабевает и здесь между первым и вторым слоями замазки наблюдаются остатки карнизов каучука, которые отвечают положению грибообразного купола первого этапа роста. Головная часть купола может подняться до поверхности второго слоя замазки и образовать на более высоком уровне грибообразный купол. Остатки карнизов каучука от грибообразного купола первого этапа роста



Рис. 80. Колоннообразный купол после двух этапов роста. (Вертикальный разрез модели 105) Исходные данные: внизу — каучук 6 мм, вверху — замазка первого слоя 8 мм, время первого вращения 8 мин при 300 г; добавлен второй слой замазки 8 мм, время второго вращения 45 сек при 300 г

связаны с основной частью купола второго этапа и представляют собой его ответвления. Эти ответвления можно сопоставить с карнизами, или навесами, соляных диапиров нижнего этажа. Периферические части грибообразного купола более высокого уровня соответствуют навесам соляных диапиров второго этажа.

На рис. 79 изображена сложная форма грибообразного купола, образовавшегося в результате трех этапов роста.

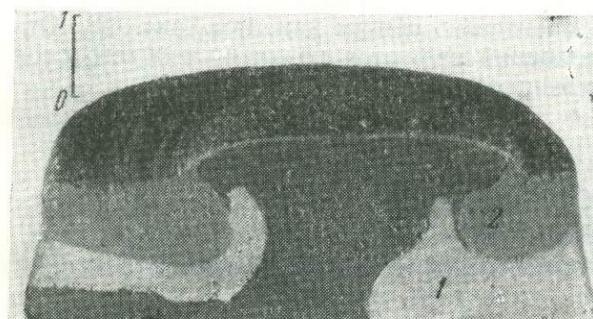


Рис. 81. Купол с двумя этажами навесов (карнизов) после двух этапов его роста. (Вертикальный разрез модели 104)

Исходные данные: внизу — каучук 6—7 мм, вверху — замазка первого слоя 8 мм, время первого вращения 8 мин при 300 г; добавленный второй слой замазки 8 мм, время второго вращения 30 сек при 300 г

В первом и втором этапах роста этот купол находился в третьей стадии неустойчивости, так как от головной части купола отходят ответвления или навесы, расположенные на границе первого и второго, а также второго и третьего слоев замазки. Это остатки грибообразного купола первого и второго этапов роста. Во время третьего этапа роста (после наложения третьего слоя замазки) головная часть грибообразного купола второго этапа роста поднялась, но не вышла к поверхности третьего слоя, а только антиклинально изогнула его. Наличие в данном случае в вертикальном разрезе купола двух ответвлений — карнизов на разных уровнях и положение головной части купола выше второго навеса указывают на сложную историю его роста. Итак, по форме грибообразного купола можно судить об эволюции его роста.

Характер перемещения при наличии двух слоев легкого материала.
При рассмотрении модели 129, содержащей два слоя легкого каучука, разделенных тяжелым слоем замазки и покрытой вторым тяжелым слоем замазки, после вращения ее в центрифуге наблюдалось поднятие

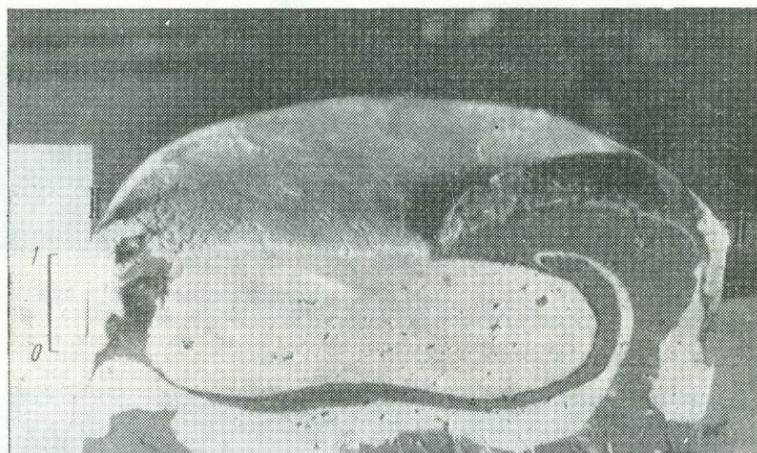


Рис. 82. Характер перемещения при наличии двух слоев легкого материала. (Вертикальный разрез модели 129)

Исходные данные: нижний слой каучука 6–7 мм, нижний слой замазки — 8 мм; верхний слой каучука — 4 мм, верхний слой замазки — 16 мм; время вращения модели в центрифуге 5 мин при 990 g

легкого каучука из обоих горизонтов по общим каналам (рис. 82). Определяющими среди этих внедрений являются поднятия нижнего слоя каучука, имеющего большую мощность.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В УСЛОВИЯХ ИНВЕРСИИ ПЛОТНОСТИ, ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования на вязких жидкостях и пластичных материалах дают возможность изучить процесс перемещения в установке инверсии плотности и выявить основные его закономерности. Как указывалось, это имеет значение для выяснения причин и механизма формирования соляных диапиров и глубинных диапиров, а также (по В. В. Белоусову, 1962, 1966) магматических астенолитов, всплывающих из верхней мантии.

По результатам моделирования установлены следующие основные закономерности.

1. Перемещение легкого и тяжелого материалов происходит по отдельным изолированным ячейкам, напоминающим ячейки конвективного движения при тепловой стационарной конвекции в жидкостях и газах. Для последней характерна непрерывная повторяемость.

В опытах движение двух материалов разной плотности может быть охарактеризовано как ограниченное конвективное движение или, по В. В. Белоусову, адвекция. Вертикальное направление перемещения материала в пределах ячеек адвективного движения является основным, но с ним связано и горизонтальное перемещение. Тяжелый материал, опускаясь, отжимается в стороны и вытесняет из-под себя легкий материал. Последний, поднявшись вверх, растекается по поверхности тя-

желого слоя и в свою очередь способствует движению тяжелого материала вниз. Движение заканчивается, когда легкий материал поднимается наверх и инверсия плотности исчезает.

Перемещение по адвективным ячейкам приводит к образованию из легкого материала, поднимающегося по периферии ячеек, кольцевых массивов. Такие массивы состоят из куполов разной высоты, соединенных перемычками. Среди кольцевых массивов в зависимости от стадии процесса перемещения выделяется несколько разновидностей: прерывистые, дугообразные и почти сплошные кольцевые массивы. Купола кольцевых массивов являются куполами первой генерации. С формированием кольцевых массивов связан разрыв слоев тяжелого материала и опускание его в центре адвективных ячеек в виде крупных капель. Это приводит к образованию внутри кольцевых массивов чашеобразных впадин — первичных компенсационных мульд. Поднятие легкого материала на периферии адвективных ячеек в виде кольцевых массивов обуславливает в горизонтальном срезе моделей кольцевое расположение куполов вокруг впадин, а в вертикальном срезе — призматическую форму ячейки.

2. Процесс перемещения тяжелого и легкого материала осуществляется в четыре стадии. Первая стадия характеризуется пологой волнистостью границы неустойчивости. Во второй стадии легкий материал интенсивно внедряется вверх в виде ядер куполов, с чем связано начало формирования изолированных ячеек движения, представленных прерывистыми кольцевыми массивами. Внутри кольцевых массивов возникают первичные компенсационные впадины. Для третьей стадии характерен прорыв легким материалом тяжелого вплоть до растекания его по поверхности последнего с образованием карнизов у ядер куполов. С этой стадией связано полное формирование ячеек адвективного движения, приобретающих вид дугообразных или почти сплошных кольцевых массивов. Прорванный купол звездчатой формы, расположенный на пересечении ряда прерывистых кольцевых массивов, создает особый тип кольцевых массивов.

Относительно ускоренный отток легкого материала в третьей стадии в ядра куполов с участков, расположенных вблизи их основания, приводит к образованию вторичных компенсационных впадин и сопряженных с ними куполов второй генерации. В пластичных материалах при выходе ядра купола из каучука на поверхность наблюдалось оседание свода с образованием надводной мульды.

Четвертой стадии, которая наблюдается только в опытах, отвечает полное перемещение легкого материала вверх, а тяжелого вниз и прекращение движения. В природе эта стадия отсутствует, что объясняется большими величинами предельного напряжения сдвига и большой вязкостью горных пород.

В слоистых моделях — на каучуке и замазке, битуме и канифоли в каждой стадии отмечались детали послойного перемещения материала в легком и тяжелом горизонтах. Проявление стадий зависит от факторов, определяющих скорость процесса, и от длительности его течения.

3. На третьей стадии перемещения возможно образование куполов второй генерации. Купола первой генерации связаны с формированием ячеек адвективного движения и образуют кольцевые массивы. В образовании кольцевых массивов участвуют следующие структуры: в прерывистых кольцевых массивах — скрытопрорванные купола; в дугообразных и почти сплошных кольцевых массивах — скрытопрорванные и прорванные купола (часто с карнизами) или валообразные поднятия. Последние образуются при соединении нескольких куполов поднятыми перемычками. Крупные прорванные купола звездчатой формы располагаются в местах пересечения кольцевых массивов. Основной структурой

кольцевых массивов является простое куполовидное поднятие, все остальные формы производные от него.

Купола второй генерации возникают из линз легкого остаточного материала в первичных прогибах (внутри кольцевых массивов). На участках образования куполов второй генерации в первичных прогибах происходит изменение знака движения — нисходящее движение сменяется восходящим. Выяснение причин, которыми обусловлена такая смена движения, имеет большое значение для ряда геологических явлений.

Модели из пластичных слоистых материалов и из битума и слоистой канифоли дают наглядное представление об условиях формирования куполов второй генерации и их взаимоотношении с куполами первой генерации.

4. Основные типы сочетания структур (впадин и поднятий) в ячейках адвективного движения определяются отношением мощности легкого слоя к мощности тяжелого и не зависят от вязкости этих слоев. В опытах были выявлены три варианта, которые обусловили три основных типа адвективных структур: мощность легкого слоя меньше мощности тяжелого; мощности их равны; мощность легкого слоя больше мощности тяжелого.

Для первого варианта характерно образование адвективных структур центрального проседания (в центре адвективной ячейки расположена широкая впадина, а на ее периферии небольшие купола). Второй вариант приводит к одинаковым по форме и размерам поднятиям и прогибам. В третьем варианте образуются адвективные структуры краевого проседания (в центре ячейки крупный купол сочетается на ее периферии с узкими впадинами).

При рассмотрении этих трех вариантов установлено также, что с увеличением мощности легкого слоя поперечные размеры куполов увеличиваются, а количество их уменьшается. Одновременно уменьшаются поперечные размеры впадин.

5. Выявлены количественные изменения размеров ячеек, куполов и расстояний между ними на битуме и патоке (и частично на пластичных материалах). Установлено, что поперечные размеры ячеек, состоящих из купола и впадины, определяются мощностью легкой жидкости и превышают ее в 3—7 раз; поперечник купола примерно равен мощности легкой жидкости и не зависит от мощности тяжелой; расстояние между куполами равно разности между размером ячейки и поперечником купола и изменяется с изменением размеров ячеек и куполов. При увеличении мощности слоя легкого материала размеры куполов увеличиваются, а расстояние между ними сокращаются.

Рассмотренные количественные закономерности показывают, что при малой мощности легкого слоя по сравнению с тяжелым мелкие купола, размеры которых равны мощности легкого слоя, сочетаются с широкими впадинами. При мощности легкого слоя, равном мощности тяжелого, купола и впадины равны между собой и равны мощности этих слоев. При мощности легкого слоя большей, чем мощность тяжелого, крупные купола, размеры которых также равны мощности легкого слоя, расположены на расстояниях, меньших, чем размеры поперечников куполов. Мощность слоя легкого материала, влияя на поперечные размеры ячеек, куполов и впадин, тем самым определяет тип сочетания структур в адвективных ячейках.

6. Форма куполов первой и второй генераций, как и их размеры, определяются мощностью легкостью материала и изменяются по стадиям развития неустойчивости. Форма куполов первой генерации зависит также от их положения в пределах кольцевых массивов.

7. Скорость роста отдельных куполов и всего процесса всплыивания легкого материала возрастает с увеличением мощности легкого и тяже-

лого слоев, а также с увеличением разности их плотностей и с уменьшением вязкости легкого слоя.

8. Рост куполов из легкого каучука при двух- или трехкратном наложении слоев тяжелой замазки каждый раз сопровождается возобновлением перемещения, происходящего по одним и тем же каналам. В природных условиях это соответствует новым этапам усиления роста соляных куполов, которые следовали за перерывами в осадконакоплении и происходили при возрастании мощности надсолевых толщ. О наличии повторных перемещений свидетельствует несколько уровней карнизов, отходящих от головной части ядра. При этом хорошо видна связь формы ядра с этапами его формирования.

9. В связи с различной в разных слоях вязкостью (прочностью) слоев замазки процесс роста куполов может характеризоваться этажностью развития, обусловленного остановкой перемещения на определенных уровнях, приуроченных к подошве слоев большей прочности (вязкости).

10. Поднятие легкого каучука из двух его слоев, разделенных тяжелой замазкой, из обоих горизонтов происходит по общим каналам.

III. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ ОБРАЗОВАНИЯ СОЛЯНЫХ СТРУКТУР В ПРИКАСПИЙСКОЙ ВПАДИНЕ

НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ СТРУКТУР

Соляные структуры по происхождению являются складками нагнетания, обусловленными гравитационной неустойчивостью. Эта неустойчивость возникает в слоистой толще при наличии в ней высокопластичной соли, обладающей меньшей плотностью, чем перекрывающие ее породы. Результатом такой неустойчивости является перемещение пластичной соли к поверхности, а надсолевых толщ вниз. По Ф. Трусхайму (Trusheim, 1957, 1960), эти перемещения возможны при минимальной мощности надсолевых пород в 1,5—2 км. В этих условиях при неравномерной нагрузке на соль и наличие разрывных нарушений в надсолевых и в подсолевых отложениях соляные массы приобретают текучее состояние.

Геологические материалы по Прикаспийской впадине показывают, что размещение и формы соляных структур во внутренней и бортовых ее частях различное. Это обусловлено в первом случае всплытием соли по законам гравитации при инверсии плотности, а во втором — линейным расположением разрывных нарушений, которые в надсолевых отложениях служат путями всплытия соли.

В прибортовых зонах впадины, в южном окончании Предуральского краевого прогиба и в южном переклинальном прогибе Уральской складчатой системы, разрывные и складчатые нарушения обусловили расположение соляных куполов в виде линейно вытянутых гряд и валов. Во внутренних частях Прикаспийской впадины линейность в расположении соляных структур исчезает. Соляные купола образуют здесь кольцевые массивы вокруг межкупольных депрессий. На геологической карте предверхнеплиоценового среза они выражены кольцевыми полосами выходов более древних отложений, а на картах физических полей имеют мозаичный рисунок.

По В. Л. Соколову, Г. Н. Кричевскому (1966), яченсто-сотовое расположение соляных структур во внутренней части впадины отчетливо отмечается на глубоких срезах (свыше 2000—2500 м).

Размещение куполов в виде кольцевых массивов вокруг впадин наглядно наблюдалось в опытах на твердых пластичных материалах — легком каучуке и тяжелой замазке. В моделях (см. рис. 20, 27, 28 и 54, А) при снятии после деформации замазки в рельфе каучука видны ваннообразные вдавленности — впадины, образованные при опускании тяжелой замазки, и кольцеобразные поднятия на периферии вдавленностей, возникшие при выжимании каучука из-под них. На рис. 25 (опыт 61) виден горизонтальный срез, а на рис. 21—23 и 54 Б (опыты 106, 52, 4, 110) — вертикальный срез через модели с кольцевой системой расположения куполов, полученных после перемещения каучука вверх, а замазки вниз. В горизонтальном срезе моделей каучук образует кольца, а в вертикальном — призматические ячейки. Последние видны также в опытах на вязких жидкостях: на легком битуме и тяжелой патоке (см. рис. 30—33) и на легком битуме и тяжелой слоистой канифоли (см. рис. 51 и 59).

На основании изучения моделей установлено, что при расположении слоя легкого материала под слоем тяжелого перемещение легкого слоя вверх, а тяжелого вниз происходит в виде отдельных ячеек. Эти ячейки по форме напоминают ячейки конвективного движения при тепловой стационарной конвекции в одной подогреваемой снизу жидкости (ячейки Бенарда). В опытах с резкой границей раздела двух материалов различной плотности перемещение не является непрерывным. Как только весь легкий материал поднимется наверх, движение прекращается. В связи с этим в опытах из двух материалов с разной плотностью движение может быть охарактеризовано как ограниченное конвективное или адвективное.

Аналогия в расположении и строении структурных форм, наблюдаемых в опытах и в природных условиях, дает основание предполагать, что кольцевое расположение соляных структур во внутренней части Прикаспийской впадины обусловлено всплытием легкой соли в пределах отдельных ячеек. Таким образом, во внутренних зонах впадины основной причиной образования соляных структур является инверсия плотности горных пород и размещение их здесь обусловлено всплытием соли в пределах адвективных ячеек. В бортовых зонах разрывы облегчают всплытие соли и нарушают ее перемещение по адвективным ячейкам, что приводит здесь к линейному расположению соляных структур.

В рассматриваемом процессе перемещения выделяются три стадии различной его зрелости, которые развиты в разных зонах Прикаспийской впадины и определяют в них типы соляных куполов, а во внутренних зонах тип кольцевых массивов.

Первым главным этапом формирования соляных структур является позднепермско-триасовый этап. В это время в бортовых зонах впадины, в частности в Южно-Эмбенской (в краевой ее части), развиваются соляные поднятия типа пологих соляных антиклиналей («соляные подушки», по Трусхейму), разделенные такими же пологими понижениями (первичными компенсационными мульдами). У этих соляных поднятий нет ядер. Они представляют собой линзовидные тела, поскольку в разделяющих их впадинах при небольшой первичной мощности соли (около 1—1,5 км) она была выжата (см. рис. 5). Такой характер соляных структур отвечает первой стадии перемещения в опытах (см. рис. 34, I и 36, a). Прекращение процесса перемещения соли на первой стадии обусловлено здесь, по-видимому, ее небольшой первичной мощностью. Отсутствие соли в межкупольных впадинах после формирования линзовидных тел (соляных подушек) обусловило прекращение роста соляных поднятий, поскольку подток соли для их дальнейшего роста осуществляться не мог.

В внутренней части Южно-Эмбенской зоны, в Приволжской и Узени-Илекской бортовых зонах в связи с увеличением здесь мощности соли и надсолевых отложений и разности их плотностей наблюдается прорыв соляными массивами куполов верхнепермских пород. Рост куполов здесь в конце перми закончился, о чем свидетельствует развитие над их сводами отложений нижнего триаса (см. рис. 4). В опытах это соответствует второй стадии перемещения (см. рис. 34, II, 36, б и 37).

В Эмбенской и Хобдинской зонах в связи с дальнейшим региональным увеличением мощности соли и надсолевых пород значительная часть куполов полностью прорывает породы верхнепермско-триасового этажа (см. рис. 11).

В Центральной зоне, характеризующейся максимальной мощностью соли (до 3—4 км) и надсолевых толщ (до 8—10 км) и большей разностью их плотностей, почти все соляные массивы куполов прорывают отложения первого этажа (см. рис. 6). Формирование соляных диапиров

прорванного типа соответствуют третьей стадии перемещения в опытах (см. рис. 21, 24, 34, IV, 36, III, 36, г слева, 39).

Во второй юрско-палеогеновый и третий неоген-четвертичный этапы происходило только перераспределение соли в ранее сформировавшихся (в позднепермско-триасовом этапе) соляных куполах с образованием на их вершинах вторичных вздутий и соляных карнизов (Кононов, Джумагалиев, 1966).

Для юрско-палеогенового этапа отмечаются следующие различия в проявлении стадий перемещения в разных зонах. В Южно-Эмбенской, Приволжской и Узени-Илекской зонах у большинства куполов отмечается отсутствие роста соляных массивов. Прекращение роста куполов в этих зонах во втором этапе, по Ю. С. Кононову (1961), было обусловлено меньшей плотностью пород юрско-палеогенового возраста. В Эмбенской и Хобдинской зонах наблюдаются многочисленные купола, соляные массивы которых частично прорывают отложения этого этажа.

В Центральной зоне большая часть соляных массивов куполов прорывают юрско-палеогеновые отложения и выходят на доверхнеплиоценовую поверхность. Таким образом, для Эмбенской и Центральной зон можно отметить соответственно проявление второй и третьей стадий перемещения для второго этапа.

В Хобдинской зоне куполообразование на втором этапе проявилось менее интенсивно. О. А. Шванк (1964) на основании данных сейсморазведки пришел к выводу о существовании в пределах Хобдинского гравитационного максимума региональной мульды в поверхности соли. Б. А. Соловьев считает, что образование этой мульды нельзя объяснить первичным залеганием соли и, возможно, часть ее была отжата из Хобдинской зоны позднее. Оттоку соли, по его мнению, благоприятствовало здесь повышение прочности надсолевых толщ.

По данным экспериментов, повышение прочности отдельных слоев тяжелого горизонта, а следовательно, и их вязкости, затрудняет всплытие легкого слоя и приводит к задержке его на уровне подошвы более прочного слоя и к перемещению соли в стороны — в горизонтальном направлении (см. рис. 76).

Ослабление соляной тектоники в Хобдинской зоне Б. А. Соловьев (1966) связывает с аномальной структурой фундамента. Участки платформы с аналогичным строением фундамента (сокращенным гранитным слоем), по его мнению, характеризуются относительно большей стабильностью. Возможно, именно этим и обусловлена меньшая тектоническая активность соляных структур в Хобдинской зоне.

Третий — неоген-четвертичный этап проявился главным образом в Центральной зоне и привел к выходу соляных массивов крупных куполов на современную поверхность. В связи с этапностью перемещения у некоторых куполов Центральной зоны в верхнепермских отложениях и на предверхнеплиоценовой поверхности наблюдаются карнизы, характеризующие два наиболее крупных этапа роста куполов.

В опытах у ядер прорванных куполов наблюдались односторонние и двухсторонние карнизы, приводящие к образованию в первом случае ядер козырьковой (см. рис. 33, 42), а во втором — грибообразной формы (см. рис. 23, 36, г слева и 41). На рис. 78 и 81 наблюдаются два этажа карнизов, каждый из которых соответствует этапу роста соляных куполов.

На поверхности предверхнеплиоценового среза в Хобдинской и Эмбенской зонах начало формирования ячеек адвективного движения к концу второго этапа выражено в образовании прерывистых кольцевых массивов (см. рис. 9 и 83, I слева). Эти массивы состоят из скрытопрорванных куполов, соединенных погруженными перемычками. На глубине им, видимо, соответствуют сплошные кольцевые массивы. Пре-

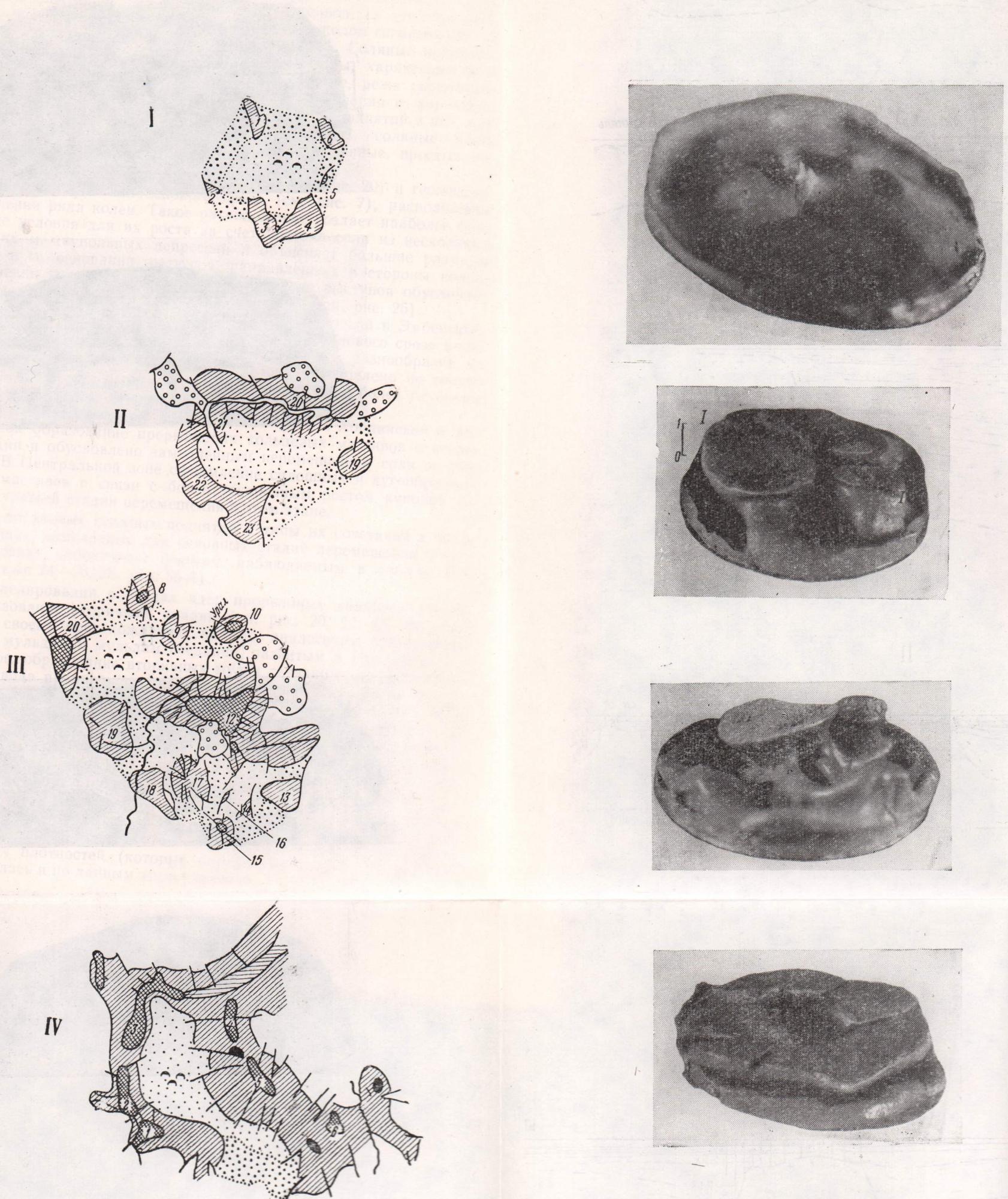
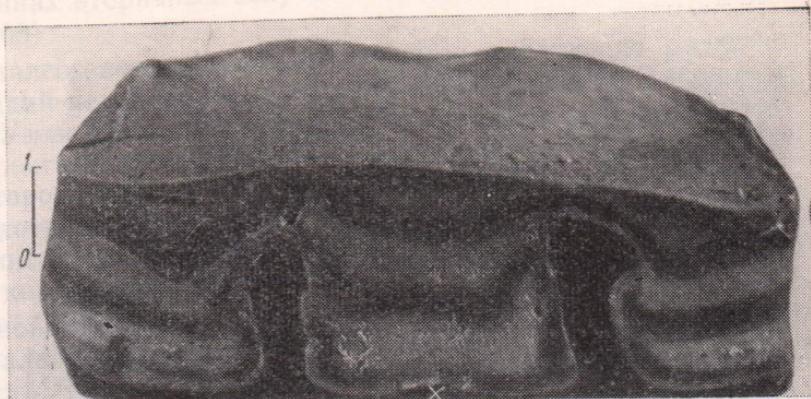


Рис. 83. Типы кольцевых соляных массивов по геологическим (слева) и экспериментальным (справа) данным
I — прерывистые кольцевые соляные массивы; II — дугообразные соляные массивы; III — купол-гигант звездчатой формы, расположенный на пересечении ряда прерывистых кольцевых соляных массивов; IV — почти сплошные кольцевые соляные массивы.
Примечание. На моделях слои тяжелой замазки (надсолевые толщи) сняты и виден рельеф поверхности каучука (соли) после деформации. Геологические схемы типов кольцевых соляных массивов даны по поверхности предверхнеплиоценового среза. Условные обозначения и названия куполов к этим схемам см. рис. 7, 8 и 9.

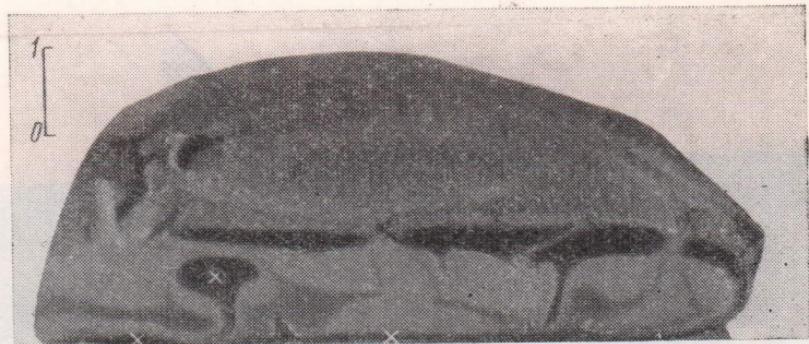
I

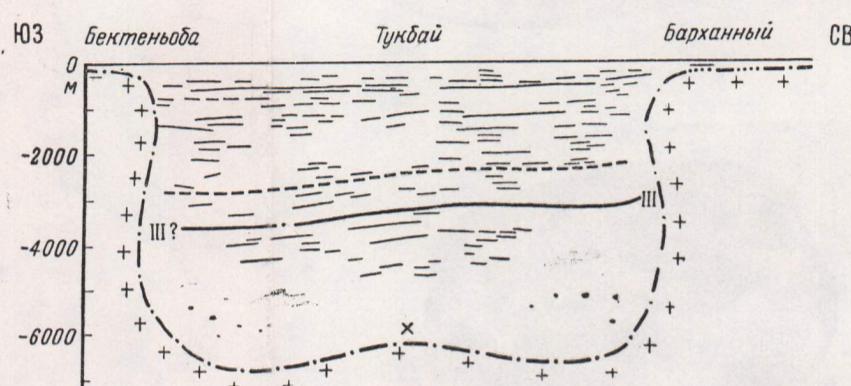
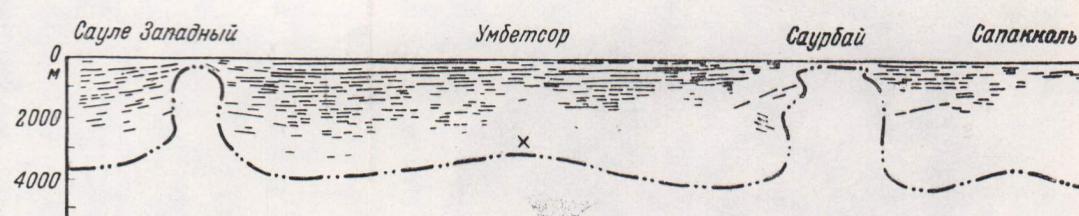
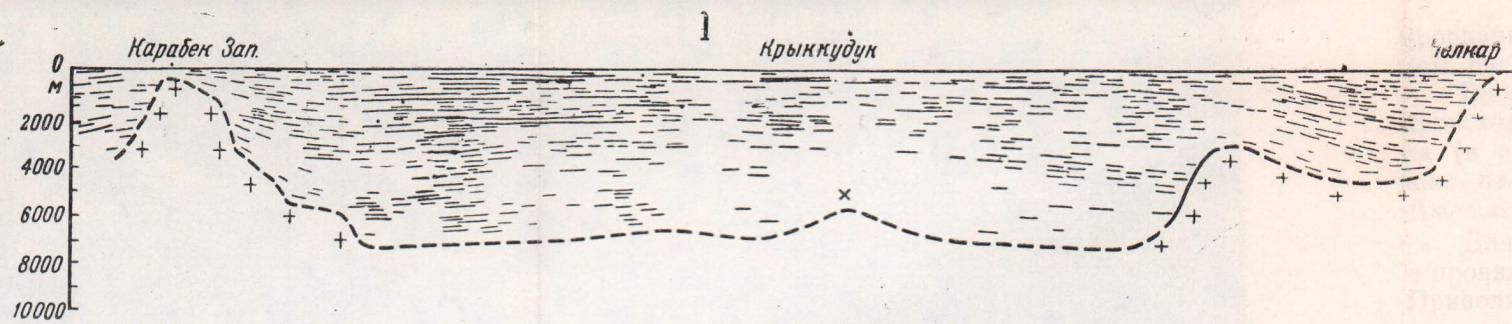


II

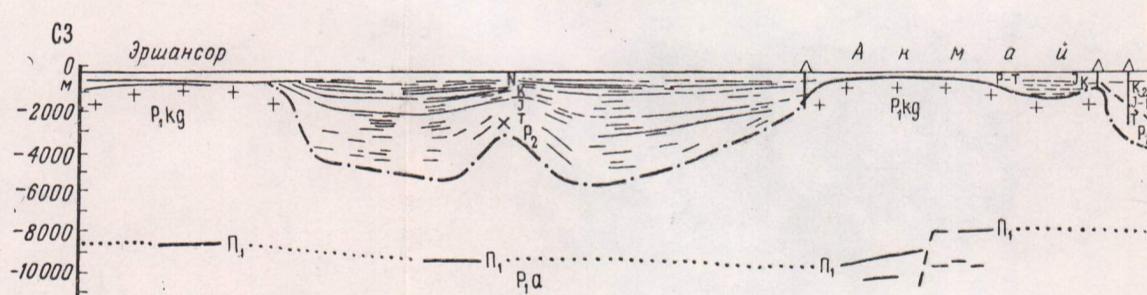


III





II



III

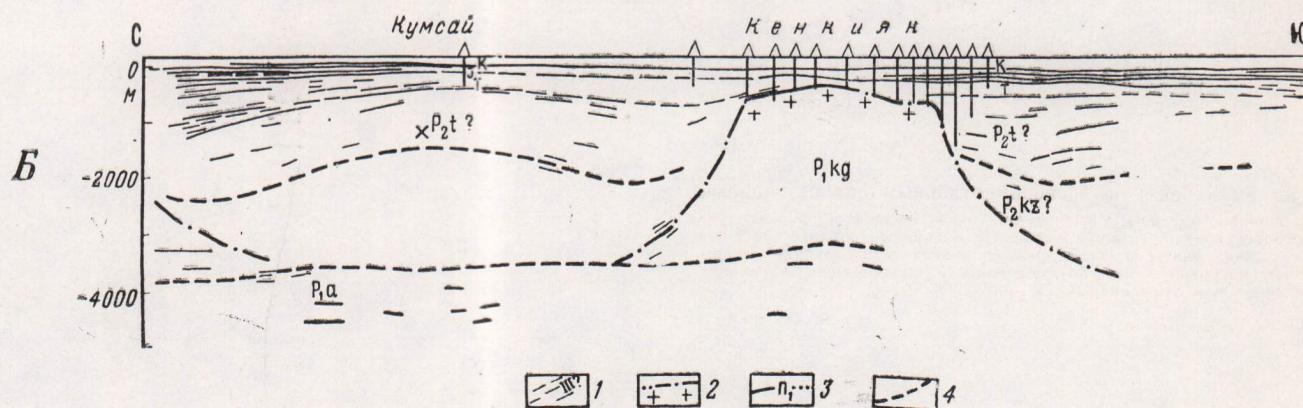


Рис. 84. Типы межкупольных соляных структур второй генерации (внутрикольцевые структуры) по геологическим (слева) и экспериментальным (справа) данным

А. Внутренние зоны Прикаспийской впадины: I — типа пассивного соляного поднятия; II — скрытопрорванного типа. Б. Юго-восточная периферическая часть Прикаспийской впадины: III — типа обращенного межкупольного поднятия (или «щит черепахи»)

1 — отражающие горизонты (подошва неокома); 2 — предполагаемое положение кровли соли; 3 — предполагаемое положение кровли соли; 4 — тектонические нарушения

Примечание. Межкупольные соляные структуры второй генерации на моделях и разрезах обозначены крестиком

рывистые кольцевые массивы наблюдались и в опытах (см. рис. 83, I справа) при небольшой мощности легкого каучука (соли).

В Центральной зоне, на предверхнеплиоценовом срезе отмечается более четкое кольцевое расположение соляных структур, обусловленное окончательным оформлением ячеек адвективного движения.

В Центральной зоне на предверхнеплиоценовой поверхности среза выделяются следующие типы кольцевых массивов: 1) дугообразные, 2) почти сплошные и 3) ряд прерывистых с куполом-гигантом на их пересечении (см. рис. 7, 8 и 83, II, III, IV слева). Соляные поднятия, соединяющиеся перемычками в кольцевые массивы, характеризуются здесь разной степенью прорыва (чаще прорванные, реже скрытопрорванные и наибольшим разнообразием форм проявления и характера их сочетания). Основные формы локальных соляных поднятий в них, как указывалось: купола-гиганты (звездчатой формы), соляные валы значительной протяженности, соляные валы укороченные, простые соляные купола и соляные перемычки.

Купола-гиганты, как показывают опыты (см. рис. 20) и геологическая карта предверхнеплиоценового среза (см. рис. 7), расположены на пересечении ряда колец. Такое расположение создает наиболее благоприятные условия для их роста за счет подтока соли из нескольких прилежащих межкупольных депрессий и объясняет большие размеры и наличие в их основании выступов, направленных в стороны колец, на пересечении которых они находятся. Наличие выступов обуславливает звездчатую форму куполов-гигантов в плане (см. рис. 25).

Более четкое в Центральной зоне, чем в Хобдинской и Эмбенской, отражение на геологической карте предверхнеплиоценового среза кольцевого расположения соляных поднятий и большее разнообразие их форм (в частности, наличие куполов-гигантов) обусловлено не только более интенсивным перемещением соляных масс, но и более глубоким срезом в предпозднеплиоценовое время.

На поверхности предверхнеплиоценового среза в Хобдинской и Эмбенской зонах образование прерывистых кольцевых массивов отвечает второй стадии и обусловлено замедленным перемещением соли во втором этапе. В Центральной зоне оформление сплошных и дугообразных кольцевых массивов в связи с более ускоренным ростом куполов соответствует третьей стадии перемещения в этом этапе.

Формы локальных соляных поднятий и типы их сочетаний в кольцевых массивах, выявленные для основных стадий перемещения в природных условиях, аналогичны формам, наблюдаемым в опытах (см. рис. 83, а также 24—26, 28, 38 и 56 А).

При моделировании в сводах ядер прорванных диапиров наблюдалось образование вторичных впадин (см. рис. 20, 22, 43, 69). Эти впадины по своему происхождению, видимо, аналогичны присводовым вдавленным мульдам и мульдам оседания, развитым в Прикаспии. По данным опытов, образование вторичных мульд связано с оседанием (обрушением) свода прорванного диапира вследствие растяжения поверхностных слоев ядра в наиболее выпуклой его части и растекания соли ядра при формировании карнизов. Возраст отложений, слагающих мульды оседания и вдавленные мульды, фиксирует время выхода соляного массива купола на поверхность. По данным опытов, можно предполагать, что присводовые мульды оседания и вдавленные мульды имеют в Прикаспийской впадине одинаковый генезис.

Возможность проявления в геологических условиях Прикаспийской впадины в каждом из этапов разных стадий перемещения в зависимости от изменения величин мощности легкой соли и надсолевых толщ и разности их плотностей (которые определяли скорость этого процесса) отмечалась и по данным экспериментов.

Влияние мощности легкого каучука (соли) на процесс перемещения в опытах иллюстрирует табл. 5 и рис. 67—69. В этих опытах с увеличением мощности каучука от 2 до 8 мм (при сохранении мощности замазки в 16 мм и величины центробежной силы в 800 д) наблюдалось ускорение процесса перемещения. Для получения третьей стадии перемещения, т. е. куполов слабо грибовидной формы, при мощности каучука 2 мм требовалось 18 мин (опыт 8 П), а при мощности 6 мм — (опыты 16 П и 14 П) и 8 мм (опыт 5 П) — лишь 1 мин. В связи с этим при равном времени развития процесса при большей мощности каучука (соли) перемещение будет более значительным, чем при меньшей его мощности.

В опытах на вязких жидкостях отмечены аналогичные соотношения. В опытах 36 и 37 мощность легкого битума изменяется от 1 до 4 см, а мощность тяжелой патоки остается равной 12 см. В опыте 37 (см. рис. 39 и 66) при мощности битума 4 см растет один крупный купол, который поднимается к поверхности патоки через 20 мин. Этот купол по своему типу аналогичен прорванным куполам Центральной зоны впадины. В опыте 36 при мощности битума 1 см образуется много мелких куполов (см. рис. 34, III), причем первый купол за 20 мин поднимается только на 3 см (рис. 74). Таким образом, при меньшей мощности легкого битума образуются более мелкие и глубоко погруженные купола. Эти купола можно сопоставить со скрытопрорванными куполами второго этапа в Эмбенской и Хобдинской зонах.

Влияние мощности тяжелой замазки (надсолевых толщ) на процесс перемещения видно из табл. 6 и опытов 89, 90, 91, 93 (см. рис. 70, 71, 72). Мощность замазки в моделях изменяли от 4—8 до 16—32 мм, а остальные исходные данные — мощность каучука 4 мм, величина центробежной силы 300 g, время вращения в центрифуге 9 мин — оставались постоянными. Во всех случаях в вертикальном разрезе модели образуются четыре мелких купола, разделенные более широкими впадинами. Различия отмечаются в стадиях перемещения. В модели 89 (см. рис. 70) при мощности замазки 4 мм наблюдается в основном вторая стадия перемещения. В модели 90 при мощности замазки 8 мм из четырех куполов три прорвали поверхность замазки, один скрытопрорванный. В модели 91 (см. рис. 71) с мощностью замазки 16 мм все четыре купола прорвали поверхность замазки и образовали навесы (третья стадия перемещения), а в модели 93 (см. рис. 72) с мощностью замазки 32 мм большая часть легкого каучука выжата наружу (четвертая стадия). Четвертая стадия наблюдалась лишь в опытах. Следовательно, с увеличением мощности замазки (надсолевых толщ) развиваются более зрелые стадии перемещения.

Графики (см. рис. 73 и 74), составленные по данным опытов на вязких жидкостях, наглядно отражают ускорение процесса роста куполов с увеличением мощности легкого и тяжелого слоев и указывают на некоторые детали этого процесса. Из них видно, что скорость роста куполов во времени меняется. В начале кривые скорости роста куполов почти всегда отлогие (первая стадия замедленного роста), затем они становятся крутыми (вторая стадия ускоренного роста). В самом конце наблюдается еще большее ускорение (третья стадия), а затем выполнивание кривой, которое обусловлено выходом ядер куполов на поверхность и образованием карнизов.

При увеличении мощности битума и патоки отмечается различное время зарождения куполов и величин отрезков, соответствующих разным стадиям их роста. При увеличении мощности битума (соли) наблюдается уменьшение отрезка пологой части кривой начального роста купола (см. рис. 73). Это указывает на образование ядра купола вскоре после его возникновения. Увеличение мощности битума сказывается и в более быстром появлении куполов.

Увеличение мощности тяжелой патоки (надсолевых толщ) вызывает некоторое замедление в появлении и росте куполов (см. рис. 74). В связи с увеличением нагрузки, видимо, повышается вязкость патоки (надсолевых толщ), что затрудняет возникновение куполов и вначале замедляет их рост. В данном случае пологая часть кривой скорости роста, отвечающая первой стадии формирования куполов, сохраняется и при большой мощности патоки. Затем после поднятия купола на какую-то высоту часть нагрузки снимается, вязкость надсолевых толщ уменьшается и купол растет быстрее. Из этого следует также, что при предельно больших мощностях тяжелого слоя развитие куполов может либо остановиться на начальной стадии, либо они вообще не будут возникать. Последнее отмечается на каучуке и замазке в опыте 94. Ускорение роста куполов в большей степени связано с увеличением мощности слоя легкого материала и в меньшей степени с увеличением мощности тяжелого (см. рис. 73, табл. 7 и 9).

Итак, по результатам опытов видно, что скорость роста куполов определенным образом обусловлена мощностью осадков (соли и надсолевых толщ), что согласуется с наблюдениями в Прикаспийской впадине. Данные экспериментальных исследований помогают расшифровать детали этих соотношений.

Сопоставление форм соляных структур в различных зонах Прикаспийской впадины, в которых эти структуры наблюдались в разных стадиях перемещения, дает представление о всем процессе в целом. По данным опытов и в природных условиях установлена одинаковая направленность этого процесса. Форма структур, стадии развития процесса перемещения и мощности соли и надсолевых толщ, обуславливающие эти стадии, могут быть выделены как основные признаки для проведения тектонического районирования.

В отношении связи процесса формирования соляных куполов с общими колебательными движениями можно высказать следующие соображения.

Формирование «соляных подушек» (первая стадия перемещения), которое происходило на фоне регионального прогибания, сопровождавшегося более интенсивным осадконакоплением в первичных компенсационных мульдах, является следствием гравитационной неустойчивости и характеризуется небольшими скоростями роста соляных структур. Эта первая стадия развития для большинства соляных куполов Прикаспийской впадины завершилась в позднепермское время, вероятно, даже в первую его половину. В юго-восточной части Южной бортовой зоны (у внешнего ее края) это перемещение и закончилось первой стадией. Надо предполагать, что такие структуры есть и в других бортовых зонах впадины.

Ядра соляных куполов начали формироваться (вторая стадия перемещения) еще при прогибании территории в результате избыточной нагрузки осадков, накопившихся в первичных компенсационных мульдах. Перемещение соли в ядра куполов усиливается во время региональных поднятий территории, когда вследствие размыва в своде купола части надсолевых толщ разность нагрузок на соль в своде купола и в межкупольных прогибах увеличивается, а вязкость надсолевых толщ уменьшается. Первое способствовало перемещению соли из «соляных подушек» и из первичных межкупольных впадин в соляные ядра, а второе облегчало ее всплытие.

По многочисленным опытам на вязких жидкостях установлено, что с увеличением мощности легкого битума поперечные размеры куполов увеличиваются (см. рис. 60). К моменту достижения куполом поверхности тяжелой жидкости его поперечные размеры примерно равны первоначальной мощности легкого битума (соли) и не обнаруживают зависи-

симости от мощности тяжелой жидкости (надсолевых толщ). В опытах на твердых материалах также установлена зависимость поперечных размеров куполов от мощности легкого каучука.

Поперечные размеры впадин (первичных компенсационных мульд) в опытах на вязких жидкостях тоже определяются мощностью легкого битума (см. табл. 4). При небольшой мощности битума (соли) мелкие купола располагаются на расстояниях в несколько раз больших, чем размер поперечника купола (см. рис. 34, IV). В Прикаспийской впадине такие соотношения наблюдаются в юго-восточной бортовой ее части. С увеличением мощности легкого битума размеры поперечников куполов увеличиваются, а размеры впадин отстают от увеличения поперечников куполов. Более крупные купола при этом располагаются на расстояниях немного больших, чем размер поперечника купола (см. рис. 33). Аналогичное расположение куполов мы видим в Эмбенской зоне. При дальнейшем увеличении мощности легкого битума поперечные размеры куполов становятся большими, чем размеры впадин (см. рис. 64). Это отвечает распределению куполов-гигантов в Центральной зоне впадины, где купола расположены на расстояниях меньших, чем размер их поперечников.

По характеру движения материала при образовании соляных куполов, по данным опытов и анализа геолого-геофизических материалов по Прикаспийской впадине, выделяется ряд их кинематических типов.

Во внутренних зонах впадины в основном развиты соляные структуры типа кольцевых массивов (первой генерации), образующиеся при всплытии соли на периферии отдельных адвективных ячеек движения. Локальные соляные структуры этих кольцевых массивов обычно находятся в разных стадиях перемещения. Особенно четко это видно в Центральной зоне. Крупные купола, или купола-гиганты кольцевых массивов (Индер, Челкар, Эльтон, Баскунчак и др.), являются главными соляными структурами. Остальные соляные структуры — соляные валы укороченные и значительной протяженности, простые купола и соляные перемычки, слагающие большую часть кольцевых массивов, являются сопутствующими. Они отличаются от главных не только размерами и формой, но и степенью прорыва. Так, в Центральной зоне сопутствующие соляные структуры не всегда являются прорванными.

Как главные, так и сопутствующие соляные структуры кольцевых массивов принадлежат одному семейству и связаны с образованием конкретных адвективных ячеек. Паркер и Мак-Доуэлл (1957), произведившие моделирование процесса роста соляных куполов, выделяют первичные, или главные, соляные купола (центры), вокруг которых образуются компенсационные мульды, а на краю последних — купола второй генерации. Аналогичное расположение соляных структур в Приmekсиканской впадине Г. Е. Муррей (Murray, 1961) характеризует, как «гнезда» или «скопище» соляных структур. Эти представления, по нашему мнению, не являются правильными, так как по результатам проведенного моделирования можно говорить только о куполах генетически связанных семейств, к которым относятся купола кольцевых массивов. Главные и сопутствующие купола кольцевых массивов имеют один генезис и являются куполами первой генерации.

Купола Круглый, Челкар, Индер, Тюбекудук, Баскунчак, Эльтон и другие в подсолевых отложениях по данным сейсморазведки характеризуются наличием структурных неровностей (разломов). Под сопутствующими куполами подобных нарушений не отмечается. Ю. А. Косягин (1950) считает, что купола-гиганты являются структурами с платформенными корнями. Такие нарушения (разломы) в подсолевом ложе под главными куполами могут рассматриваться, как причина появления первых неровностей в кровле соли, вокруг которых в пределах

конвективных ячеек формируются остальные соляные структуры кольцевых массивов. Таким образом, образование соляных структур кольцевых массивов и закономерности их размещения во внутренних зонах впадины обусловлены как действием сил гравитации, так отчасти и текtonикой подсолевого ложа.

В пределах внутренних зон Прикаспийской впадины сейсморазведкой выявлены глубоко погруженные соляные структуры, не имеющие отражения на геологической карте со снятым покровом верхнеплиоценовых и четвертичных отложений и на гравиметрической карте. Эти структуры размещены в первичных компенсационных мульдах и на сейсмопрофилях фиксируются перегибами в глубоких отражающих горизонтах. Они расположены внутри кольцевых массивов. К таким соляным структурам в Центральной зоне относятся купола Тукбай, Мухор, Молкудук, Истовой, Косколь и др. Среди них наиболее изучено поднятие Тукбай, расположенное между куполами Бекеньба и Барханный (см. рис. 7).

В Эмбенской зоне структуры подобного типа наблюдаются в Доскор-Макат-Сагизском, Тюлюс-Кулсаринском, Акмай-Эршансорском и в других межкупольных пространствах. Б. А. Соловьевым такие структуры отмечаются и в Хобдинской зоне.

Среди межкупольных (внутрикольцевых) соляных структур (вторая генерация) Прикаспийской впадины выделяются следующие типы: массивные соляные поднятия, скрытопрорванные вторичные соляные купола, прорванные вторичные соляные купола (развиты исключительно редко) и обращенные межкупольные поднятия (или «щит черепахи»). Эти структуры представляют собой генетически связанный ряд (рис. 84).

О расположении, форме и характере формирования межкупольных соляных структур второй генерации (глубоко погруженных в межкупольных депрессиях) дают представление сейсмические профили и опыты (см. рис. 84).

В вертикальных разрезах моделей 135 и 65 видно, что по мере оттока легкого каучука в ядра первичных куполов вокруг них идет формирование вторичных компенсационных депрессий (см. рис. 43, 47 и 84, I справа). В результате между двумя смежными куполами первой генерации, в межкупольном пространстве, пассивно возникает остаточное поднятие соли (см. рис. 47, 48 и 84, I справа). Это поднятие представляет собой участок соляного пласта, окруженный вторичными компенсационными прогибами, над которыми нижние горизонты надсолевых толщ опустились. В моделях 59, 60 и 171 остаточная линза легкого каучука в межкупольном пространстве послужила для образования поднятия скрытопрорванного типа, которое в поверхностных горизонтах не выражено (см. рис. 49, 50, 51 и 84, II справа).

Из приведенных сейсмических разрезов и данных экспериментов видно, что одновременно с формированием скрытопрорванных и прорванных куполов первой генерации и сопряженных с ними вторичных компенсационных мульд в первичных мульдах образуются внутрикольцевые глубоко погруженные соляные структуры второй генерации. Эти купола представляют самостоятельный (второй) кинематический тип.

Купола второй генерации являются часто пассивными поднятиями, образовавшимися внутри кольцевых массивов (в первичной компенсационной мульде) над линзами остаточной соли (см. рис. 84, I слева). В том случае, когда мощность соли этих линз достаточно большая, могут образоваться купола второй генерации скрытопрорванного типа (обычно прорывают только часть верхнепермских отложений) — см. рис. 84, II слева, а исключительно редко и прорванного типа (купол Шокларсай).

Таблица 12

тур Прикаспийской впадины

Схема классификации соляных струк

Зоны	Мощность соли, км	Мощность надсолевых толщ, км	Глубина залегания подсолевого ложа, км	Причины образования соляных структур	Кинематический тип соляных структур	Размещение на поверхности предверхнеплиоценового среза	Генерация
Юго-восточная часть Южно-Эмбенской	1—1,5	1,2—2	2—2,5	Над первичными линзами соли	Образующиеся до формирования адвективных ячеек	—	
Эмбенская	>1,5—<3	>2—<7	5—8				
Хобдинская	>1,5—<3	>2—<7	7—9				
Центральная	3—4	7—9	10—11	В пределах адвективных ячеек	Структуры кольцевых массивов (возникающие в адвективных ячейках)	Кольцевые цепочки	Первая
Южно-Эмбенская, Приволжская, Узени-Илекская	1—2	2—3	2,5—5	По прибортовым разрывам	Ориентированные вдоль приборовых разрывов	Линейные цепочки	
Юго-восточная часть Южно-Эмбенской	1—2	2—3	2,5—5				
Центральная	3—4	7—9	10—11				
Эмбенская	>1,5—<3	>2—<7	5—8				
Хабдинская	>1,5—<3	>2—<7	7—9	Над остаточными линзами соли	Межкупольные глубокопогруженные (внутрикольцевые)	—	Вторая

Стадии перемещения	Морфологический тип соляных структур			Структуры, перспективные на нефть и газ	
	Локальные соляные структуры		Соляные кольцевые массивы		
	Положительные	Отрицательные			
в надсолевых толщах	по типу ядра				
Первая («соляных подушек»)	Пологие соляные поднятия, или «соляные подушки»	Ядра нет (линза соли)	Первичные компенсационные мульды	«Соляные подушки»	
Вторая (скрыто-прорванных куполов) — начало формирования адвективных ячеек	1. Соляные купола 2. Укороченные соляные валы (редко значительной протяженности) 3. Соляные перемычки	Скрытопрорванные	1. Межкупольные (внутрикольцевые) депрессии 2. Вторичные компенсационные мульды	Прерывистые	
Третья (прорванных куполов) — дальнейшее формирование адвективных ячеек	1. Крупные соляные купола — купола-гиганты (главные) 2. Соляные купола (сопутствующие) 3. Соляные валы укороченные и значительной протяженности (сопутствующие) 4. Соляные перемычки	1. Прорванные (колонно- и грибообразные) у главных куполов 2. Скрытопрорванные и прорванные у сопутствующих куполов	1. Межкупольные (внутрикольцевые) депрессии 2. Вторичные компенсационные мульды 3. Вдавленные мульды (над сводами куполов)	1. Почти сплошные 2. Дугообразные 3. Прерывистые с куполом-гигантом на их пересечении	
Вторая	1. Линейно ориентированные соляные купола 2. Соляные гряды или линейно вытянутые соляные валы 3. Соляные перемычки	Скрытопрорванные, реже прорванные	1. Межгрядовые прогибы 2. Мульды оседания (над сводами куполов)	Соляные перемычки, соединяющие соляные массивы куполов в кольцевые массивы	
Одновременно с образованием скрытопрорванных и прорванных куполов первой генерации	Обращенные межкупольные поднятия (или «щит черепахи»)	Соли нет		Обращенные межкупольные поднятия	
	Пассивные соляные поднятия	Ядра нет (остаточная линза соли в первичной компенсационной мульде)	Вторичные компенсационные мульды	Пассивные соляные поднятия	
	Межкупольные, глубокопогруженные вторичные соляные купола	Скрытопрорванные		Внутрикольцевые (межкупольные) глубокопогруженные соляные купола	

В первичных компенсационных мульдах в случае формирования в их пределах скрытопрорванных куполов второй генерации наблюдается смена нисходящего движения восходящим или инверсия движения. Необходимо обратить внимание на иной механизм образования соляных структур второй генерации (внутрикольцевых, по автору), чем это считают П. Д. Паркер и А. Н. Мак-Доузл. Соляные структуры второй генерации в их понимании соответствуют сопутствующим соляным структурам кольцевых массивов.

Формирование соляных куполов второй генерации в Прикаспийской впадине в основном было связано с позднепермским — нижнетриасовым этапом. Структуры подобного типа, вероятно, широко развиты в нижних горизонтах надсолевых отложений в межкупольных первичных депрессиях внутренней части впадины. При небольшой первоначальной мощности соли в межкупольных пространствах образуются бескорневые структуры второй генерации типа «щит черепахи». Такие соляные поднятия наблюдаются в юго-восточной бортовой части впадины (см. рис. 84, III слева). Тип внутрикольцевых структур второй генерации зависит от стадии перемещения соли и от ее мощности, а поперечные размеры их определяются остаточной (к моменту их образования) мощностью соли.

Третий кинематический тип соляных структур развит в бортовых зонах впадины. Образование их связано с системой унаследованно разvивавшихся разрывных нарушений. Соляные структуры этого типа представлены линейно ориентированными цепочками соляных куполов и валов или гребней.

Выявленные по данным моделирования и анализа геолого-геофизических материалов некоторые закономерности механизма формирования и размещения соляных структур Прикаспийской впадины дают возможность наметить предварительную схему их классификации (табл. 12).

В схеме выделены три рассмотренных кинематических типа соляных структур и морфологические типы положительных и отрицательных соляных структур.

Во внутренней части Прикаспийской впадины основными положительными морфологическими типами соляных структур, образующими кольцевые массивы, являются: соляные купола, соляные перемычки, соляные валы (укороченные и значительной протяженности), крупные соляные купола или купола-гиганты звездчатой формы. Сочетание их в кольцевых массивах может быть различным. Эти структуры фиксируются и в моделях.

В бортовых частях впадины выявлены иные морфологические типы положительных соляных структур: пологие соляные поднятия, или «соляные подушки», линейно ориентированные соляные купола, соляные гряды или линейно вытянутые соляные валы, осложненные соляными куполами, соляные перемычки и структуры типа «щит черепахи». Простейшей формой положительных соляных структур являются соляные купола.

Среди отрицательных форм соляных структур выделяются: первичные компенсационные мульды (межкупольные депрессии, внутрикольцевые депрессии), вторичные компенсационные мульды, сопряженные с соляными куполами второй генерации, вдавленные мульды и мульды оседания, расположенные на сводах соляных куполов, межгрядовые прогибы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение механизма тектонических процессов, развивающихся в обстановке инверсии плотности горных пород, проводилось применительно к формированию соляных структур Прикаспийской впадины. Оно было основано на анализе геолого-геофизических материалов и результатах моделирования. В итоге этих исследований можно прийти к следующим выводам.

1. В процессе роста соляных куполов, как показали опыты, перемещение легкой соли с границы неустойчивости вверх, а тяжелых надсолевых пород вниз, подчиняется силам гравитации, возникающим при инверсии плотности этих пород, и происходит по отдельным ячейкам адвективного движения. В природных условиях Прикаспийской впадины это нашло выражение в образовании во внутренних ее зонах кольцевых соляных массивов и внутрикольцевых (первичных межкупольных) чащебразных депрессий, сложенных мощными толщами надсолевых пород. На геологической карте предверхнеплиоценового среза каждой ячейке адвективного движения соответствует кольцевая цепочка соляных куполов, которые окаймляют межкупольную депрессию. В бортовых зонах впадины наличие разрывов нарушает структуру ячеек адвективного движения и приводит к линейному расположению соляных куполов. Таким образом, размещение соляных куполов в Прикаспийской впадине определяется либо подъемом соли в пределах адвективных ячеек, либо наличием разрывов, по которым происходит ее всплытие.

2. В процессе перемещения легкой соли в природных условиях могут быть выделены три, а в опытах четыре стадии, характеризующие разную зрелость этого процесса. Проявление той или иной стадии, при одинаковом времени, определяется скоростью, с какой идет этот процесс. Во внешних частях бортовых зон впадины, где процесс перемещения протекал медленно, развитие соляных структур закончилось на первой стадии, а во внутренних зонах за тот же период времени они достигли второй и третьей (зрелой) стадий перемещения. Каждой стадии соответствуют вполне определенные формы соляных куполов и типы их сочетаний в кольцевых массивах. Сопоставление форм соляных структур в разных зонах Прикаспийской впадины, отвечающих разным стадиям процесса перемещения первого главного (позднепермско-триасового) этапа, дает представление о всем процессе в целом. По данным опытов и в природных условиях устанавливается одинаковая направленность этого процесса.

3. Как показали опыты, скорость процесса перемещения возрастает с увеличением мощности легких и тяжелых пород и с увеличением разности их плотностей. В Прикаспийской впадине все эти показатели увеличиваются от бортов к центральной части впадины, что приводит к изменению форм соляных структур по зонам и к большей зрелости процесса во внутренних зонах.

4. Различные величины мощности легкого материала — соли и тяжелого — надсолевых толщ определяют в опытах и в природных условиях Прикаспийской впадины два типа сочетания соляных куполов с разделяющими их депрессиями. По данным опытов, при малой мощности легкого материала (соли) возникают купола с небольшими поперечными размерами, сочетающиеся с широкими плоскими мульдами. При большой мощности легкого материала образуются крупные купола, разделенные узкими и глубокими депрессиями. В Прикаспийской впадине первое характерное для большей периферической ее части и Хобдинской зоны, а второе — для Центральной зоны. Во всех случаях размеры поперечников куполов соизмеримы с первичной мощностью питающего их слоя соли. Поэтому по размерам поперечников куполов можно судить о первичной мощности соли.

5. Форма ядер соляных куполов определяется величиной первичной мощности соли. На форму ядер влияет также зрелость процесса перемещения. По форме соляных ядер и по наличию в некоторых случаях у них карнизов, расположенных на разных уровнях, можно судить об истории роста соляных куполов.

6. Намечены основные морфологические и кинематические типы соляных структур и указано размещение их по зонам Прикаспийской впадины.

7. В отношении перспектив поисков залежей нефти и газа во внутренних зонах Прикаспийской впадины наиболее благоприятными являются структуры второй генерации, расположенные в первичных межкупольных депрессиях (внутри кольцевых массивов), а также соляные перемычки, соединяющие соляные купола первой генерации в кольцевые массивы. В периферических частях впадины наибольший интерес представляют «соляные подушки» и обращенные межкупольные поднятия (структурь типа «щит черепахи»). В этих структурах сохраняется наибольший объем надсолевых толщ и они слабо нарушены сбросами.

8. Солянокупольные структуры Прикаспийской впадины можно рассматривать как природную модель, характеризующую развитие структур нагнетания. Полученные в результате исследования выводы могут быть, видимо, применены и для объяснения ряда явлений, связанных с подъемом магматических астенолитов из волновода верхней части мантии. В частности, расположение выгибов (антеклиз) земной коры, образующихся при поднятии астенолитов с кровли волновода (В. В. Белоусов, 1966), вокруг прогибов (синеклиз) в целом напоминает кольцевое расположение соляных куполов. По аналогии это дает возможность предполагать, что движение астенолитов под платформами также происходит по адвективным ячейкам. Стадии перемещения астенолитов, возможно, будут соответствовать стадиям роста соляных куполов, так как условия перемещения в том и другом случае были, по-видимому, близкими.

9. В результате выполненной работы установлено, что метод моделирования позволяет с большей детальностью выявлять особенности развития тектонических структур и его необходимо применять шире при такого рода исследованиях. Проведенные исследования также показывают, что выявление вначале природных условий формирования соляных структур, а затем изучение этого процесса на моделях является правильным. Только на этом пути экспериментальные работы могли быть поставлены с учетом конкретной геологической обстановки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авров В. П. и др. Применение сейсморазведки для изучения новейшей тектоники междуречья Урала и Волги. Изв. АН КазССР, серия геол., № 6, 1965, с. 53—58.
- Авров П. Я. Тектоника и перспективы нефтегазоносности верхнепалеозойских отложений Актюбинского Приуралья. Изв. АН КазССР, серия геол., вып. 1 (26), 1957, с. 56—87.
- Авров П. Я. и др. Межкупольные поднятия восточной окраины Прикаспийской впадины и перспективы ее нефтеносности. «Геология нефти и газа», 1969, № 11, с. 43—47.
- Авров П. Я., Космачева Л. Т. Механизм образования солянокупольных структур Северо-Прикаспийской впадины. Изв. АН КазССР, серия геол., вып. 1 (38), 1960, с. 19—33.
- Айзенштадт Г. Е.-А. О структурной зональности солянокупольной области Северного Прикаспия. «Геология нефти и газа», 1959, № 8.
- Айзенштадт Г. Е.-А., Антонов К. В. Формирование соляных куполов и залежей нефти Южной Эмбы. Тр. ВНИГРИ, вып. 207, Л., Гостоптехиздат, 963а, 315 с.
- Айзенштадт Г. Е.-А., Герштейн Э. И. О первоначальной мощности кунгурского соляного комплекса Прикаспийской впадины. Докл. АН СССР, т. 151, № 5, 1963б, с. 1156—1158.
- Айзенштадт Г. Е.-А. и др. Прикаспийская впадина — мощный резерв нефтяной и газовой промышленности в Европейской части СССР. «Геология нефти и газа», 1971, № 5, с. 46—49.
- Альжанов А. А., Булекбаев З. К., Эвентов Я. С. Обоснование глубокого и сверхглубокого бурения на подсолевой газ и нефть в восточной части Прикаспийской впадины. «Геология нефти и газа», 1970, № 7, с. 15—19.
- Арабаджи М. С. и др. О продолжении Предуральского передового прогиба в пределах Прикаспийской впадины. «Советская геология», 1965, № 7, с. 63—76.
- Аристархова Л. Б. О значении геоморфологического метода для геологического карттирования Урало-Эмбенской солянокупольной области. Уч. зап. МГУ, серия геогр., вып. 182, 1956.
- Артюшков Е. В. О возможности возникновения и общих закономерностях развития конвективной неустойчивости в осадочных породах. Докл. АН СССР, т. 153, № 1, 1963а, с. 162—165.
- Артюшков Е. В. Основные формы конвективных структур в осадочных породах. Докл. АН СССР, т. 153, № 2, 1963б, с. 412—415.
- Артюшков Е. В. О физических причинах возникновения полигональных структур в грунтах. В сб. «Проблемы палеогеографии и морфогенеза в полярных странах и высокогорье». М., изд-во МГУ, 1964, с. 109—130.
- Артюшков Е. В. Образование конвективных деформаций в слабо литифицированных осадочных породах. Изв. АН СССР, серия геол., 1965, № 12, с. 79—101.
- Артюшков Е. В. Слой пониженной вязкости в верхней мантии Земли и связанные с ним явления. Автореферат дисс. на соиск. уч. степени докт. физ.-мат. наук. М., 1969, 31 с.
- Безруков П. Л. О геологическом строении степных пространств к юго-востоку от г. Уральска. Бюлл. МОИП, нов. серия, т. 14, вып. 2, 1936, с. 95—130.
- Бейсенов Б. Б. О формировании межкупольных поднятий восточного борта Прикаспийской впадины. Вестн. АН КазССР, № 10 (235), 1964, с. 64—68.
- Белоусов В. В. О некоторых результатах и перспективах тектонофизических исследований. Изв. АН СССР, серия геол., 1958, № 11, с. 3—19.
- Белоусов В. В. Основные вопросы геотектоники 2 изд. М., Госгеолтехиздат, 1962, 608 с.
- Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия материков. М., «Наука», 1966, 123 с.
- Белоусов В. В. Земная кора и верхняя мантия океанов. М., «Наука», 1968, 253 с.

Белоусов В. В., Гзовский М. В. Экспериментальная тектоника. М., «Наука», 1964, 119 с.

Богачева М. И. Триасовые отложения юго-востока Русской платформы по данным бурения Аральской сверхглубинной скважины. В сб. «Материалы научно-технического совета по глубинному бурению», вып. 12. М., «Недра», 1969, с. 3—125.

Богданов А. А. Тектоника Ишимбаевского Приуралья. «Материалы к познанию геологического строения СССР», вып. 7 (11), МОИП, 1947.

Бутковский Ю. М., Кожников И. И. Солянокупольная тектоника Зауральских Сыртов. В сб. «Геология и перспективы нефтегазоносности некоторых районов СССР». Тр. Треста «Союзбургаз», вып. 4. М., «Недра», 1964, с. 98—117.

Бутковский Ю. М., Гинодман А. Г., Кожевников И. И. Новые данные о строении северной бортовой зоны Прикаспийской впадины в районе г. Уральска. В сб. «Геология и перспективы нефтегазоносности некоторых районов СССР и вопросы подземного хранения газа». Тр. Треста «Союзбургаз», вып. 5. М., «Недра», 1965, с. 138—162.

Бутковский Ю. М., Кожевников И. И. Тектоника полосы сочленения Общего и Зауральских сыртов. В сб. «Геологическое строение юго-восточных районов Русской платформы и перспективы их на нефть и газ». Тр. ВНИГНИ, вып. 50. М., «Недра», 1967.

Бутковский Ю. М., Омельченко Д. А. Геология и перспективы нефтегазоносности северной бортовой зоны Прикаспийской впадины и ее центральной части. В сб. «Геология и перспективы нефтегазоносности некоторых районов СССР и вопросы подземного хранения газа». Тр. Треста «Союзбургаз», вып. 7. М., «Недра», 1968, с. 27—54.

Буш Э. А., Кузнецов В. Г., Соколов В. Л. Позднедевонский этап развития Прикаспийской впадины. «Геология нефти и газа», 1967, № 2, с. 7—13.

Васильев Ю. М. Геологическое строение Прикаспийской впадины и закономерности распространения нефти и газа в ее недрах. Тр. МИНХ и ГП, вып. 77. М., «Недра», 1968, 282 с.

Васильев Ю. М. и др. Сверхмощный разрез кайнозоя в Центре Прикаспийской солянокупольной области. Тр. Моск. ин-та нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина, вып. 90. М., «Недра», 1970.

Виленчик А. М., Голубков В. В. Применение метода магнитотеллурических зондирований на территории Прикаспийской впадины. В сб. «Региональные геологические исследования в бортовой зоне Прикаспийской впадины». Тр. Нижне-Волжского науч.-иссл. ин-та геологии и геофизики, вып. 3. М., «Недра», 1965, с. 210—215.

Виноградов Г. В., Павлов В. П. Упругие и прочностные свойства мягких тел. Изв. АН СССР, отд. техн. наук. «Механика и машиностроение», 1959, № 2.

Воларович М. П. Применение методов исследования вязкости и пластичности в прикладной минералогии. Тр. ВИМС, вып. 66. М.—Л., Госгеолтехиздат, 1934.

Волчегурский Л. Ф., Журавлев В. С. Структурные соотношения между соляными куполами Прикаспийской впадины (на примере семейства соляного купола Санкебай—Круглый). Изв. вузов, «Геотектоника», 1965, № 2, с. 94—105.

Геология СССР, т. XXI, Западный Казахстан. Геологическое строение. Кн. 2. Коллектив авторов. М., «Недра», 1970, 344 с.

Гзовский М. В. О задачах и содержании тектонофизики. Изв. АН СССР, серия геофиз., 1954, № 3, с. 244—263.

Гзовский М. В. Метод моделирования в тектонофизике. «Советская геология», 1958, № 4, с. 53—72.

Гзовский М. В. Тектонофизика и проблемы структурной геологии. В кн. «Структуры земной коры и деформации горных пород». МГК, 21 сессия. Доклады сов. геологов. М., Изд-во АН СССР, 1960а, с. 17—31.

Гзовский М. В. Проблемы тектонофизики. М., Госгеолтехиздат, 1960б, 364 с.

Гзовский М. В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклиниория, части III и IV. М., Изд-во АН СССР, 1963, 543 с.

Гутенберг Б. Л. Физика земных недр. Перевод с англ. О. И. Силаевой, О. Г. Шаминой. М., изд-во иностр. лит., 1963, 263 с.

Дедков А. П., Бастраков Г. В. Экзотектоническая складчатость платформ (образование мелкой складчатости в условиях расчлененного рельефа). Казань, изд-во Каз. ун-та, 1967, 67 с.

Деменицкая Р. М. Кора и мантия Земли. М., «Недра», 1967, 279 с.

Долгих С. А. Микроструктурный анализ солевого ядра одного из куполов Прикаспия. «Советская геология», 1962, № 6, с. 138—142.

Ермаков В. А. Особенности надсолевой гидрохимической толщи перми на территории Волгоградского Поволжья. «Советская геология», 1971, № 2, с. 145—150.

Журавлев В. С. Основные черты глубинной тектоники Прикаспийской синеклизы. Тр. ГИН АН СССР, вып. 42. М., Изд-во АН СССР, 1960, 271 с.

Журавлев В. С. Типы соляных куполов Прикаспийской синеклизы. В кн. «Проблемы региональной тектоники Евразии». Тр. ГИН АН СССР. М., Изд-во АН СССР, вып. 92, 1963, с. 162—201.

Журавлев В. С. Сравнительная тектоника экзогенальных впадин Русской платформы. В сб. «Деформация пород и тектоника», МГК, 22 сессия. Докл. советских геологов, пробл. 4. М., «Наука», 1964, с. 177—188.

Журавлев В. С. Сравнительный анализ структур, созданных соляной тектоникой в Прикаспийской и Польско-Германской впадинах. В сб. «Условия образования и особенности нефтегазоносности солянокупольных структур». Киев, «Наукова думка», 1966, с. 90—104.

Журавлев В. С. Сравнительная тектоника Печорской, Прикаспийской и Североморской экзогенальных впадин Европейской платформы. Автореферат диссерт. на соиск. уч. степени докт. г-м. наук. М., 1969, 33 с.

Журавлев В. С. Типы локальных отрицательных структур Прикаспийской впадины. В сб. «Проблемы теоретической и региональной тектоники». М., «Наука», 1971, с. 186—203.

Журавлев В. С., Волчегурский Л. Ф. Особенности тектоники и перспективы нефтегазоносности соляных куполов юго-восточной прибрежной структурной зоны Прикаспийской впадины. «Нефтегазовая геология и геофизика», 1965, № 6, с. 7—12.

Журавлев В. С., Самодуров В. И. Проявление вторичной соляной тектоники на открытых куполах восточной части Прикаспийской синеклизы. Докл. АН СССР, т. 132, № 4, 1960, с. 891—894.

Журавлев В. С., Шлезингер А. А. Особенности тектоники и перспективы нефтегазоносности северо-восточной части солянокупольной территории Западного Казахстана. В кн. «Геологическое строение и нефтегазоносность восточной части Прикаспийской впадины и ее северного, восточного и юго-восточного обрамлений». М., Гостоптехиздат, 1962.

Журавлев В. С. и др. Казанские соленосные отложения востока Прикаспийской впадины и ее северного обрамления. Бюлл. МОИП, новая серия, отд. геол., т. 67, вып. 2, 1972а, с. 40—55.

Журавлев В. С. Сравнительная тектоника Печорской, Прикаспийской и Североморской экзогенальных впадин Европейской платформы. Труды ГИН, вып. 232, М., «Наука», 1972б, 398 с.

Знаменский В. С. и др. Геологическая эффективность МРНП при региональных сейсмических исследованиях в восточной части Прикаспийской впадины. «Нефтегазовая геология и геофизика», 1966, № 9, с. 32—35.

Калинин Н. А. Основные закономерности в морфологии и нефтегазоносности соляных куполов Западного Казахстана. «Геология нефти», 1958, № 9, с. 25—37.

Калинин Н. А. Основные черты геологического строения и нефтегазоносность Западного Казахстана. Тр. ВНИГРИ, вып. 213. Л., Гостоптехиздат, 1963, 275 с.

Кирличев М. В. Теория подобия. М., Изд-во АН СССР, 1953, 96 с.

Китык В. И. Условия образования соляных структур. Киев, Изд-во АН УССР, 1963, 291 с.

Коган А. Б. и др. Подсолевые отложения в западной части Прикаспийской впадины. «Советская геология», 1970, № 1, с. 124—128.

Кожевников И. И. Геологическое строение полосы сочленения Общего Сырта и Прикаспийской низменности. В сб. «Геология и нефтегазоносность юго-восточных районов Русской платформы». Л., Гостоптехиздат, 1958, с. 73—94.

Кожевников И. И. Особенности геологического развития и перспективы нефтегазоносности северного и северо-восточных бортов Прикаспийской впадины (платы). В кн. «Геологическое строение и нефтегазоносность восточной части Прикаспийской впадины и ее северного, восточного и юго-восточного обрамлений». М., Гостоптехиздат, 1962а.

Кожевников И. И. О формировании локальных поднятий на северном обрамлении Прикаспийской впадины. В сб. «Материалы по тектонике Нижнего Поволжья». Л., Гостоптехиздат, 1962 б, с. 90—96.

Кожевников И. И. Солянокупольная тектоника междуречья Урала и Волги по данным комплексного геологического картирования. В сб. «Геология и перспективы нефтегазоносности некоторых районов СССР». Тр. Треста «Союзбурггаз», вып. 4. М., «Недра», 1964, с. 68—81.

Кожевников И. И., Соловьев Б. А. Об изучении поверхностей основных несогласий в надсолевых комплексах солянокупольных областей. Тр. Ин-та нефтехимической и газовой промышленности им. И. М. Губкина, вып. 90. М., «Недра», 1970, с. 27—36.

Кожевников И. И., Голов А. А., Соловьев Б. А. Главные и вторичные соляные купола центральной части Прикаспийской впадины и перспективы их нефтегазоносности. В сб. «Геологическое строение юго-восточных районов Русской платформы и перспективы их на нефть и газ». Тр. ВНИГНИ, вып. 50. М., «Недра», 1966.

Кожевников И. И. и др. Методика и некоторые результаты комплексного геологического картирования закрытой солянокупольной территории Северного Прикаспия. В кн. «Солянокупольные регионы СССР и их нефтегазоносность», ч. I. Киев, изд-во «Наукова думка», 1969, с. 309—320.

Коновалов Ю. С. Некоторые новые данные о строении и нефтегазоносности верхнецирмских и триасовых отложений Южной Эмбы. Тр. Ин-та нефти АН Каз ССР, т. 3. Алма-Ата, Изд-во АН Каз ССР, 1959, с. 33—42.

- Кононов Ю. С. К вопросу о формировании соляных куполов Южной Эмбы. Тр. Ин-та нефти АН КазССР, т. 4. Алма-Ата, Изд-во АН Каз ССР, 1961, с. 41—51.
- Кононов Ю. С., Джумагалиев Т. Н. Особенности формирования и распределения соляных куполов в Прикаспийской впадине в связи с их нефтегазоносностью. В сб. «Условия образования и особенности соляно-купольных структур». Киев, изд-во «Наукова думка», 1966, с. 111—119.
- Кононов Ю. С. и др. К вопросу о строении зоны сочленения Русской платформы и скифской плиты в связи с оценкой ее нефтегазоносности. «Геология нефти и газа», 1967, № 8, с. 26—29.
- Косыгин Ю. А. Механизм образования соляных куполов. Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 20, вып. 5—6, 1945, с. 3—28.
- Косыгин Ю. А. Соляная тектоника платформенных областей. Л.—М., Гостоптехиздат, 1950, 248 с.
- Косыгин Ю. А. Тектоника нефтеносных областей. М., Гостоптехиздат, 1958, т. 1, 516 с., т. 2, 613 с.
- Косыгин Ю. А. Типы соляных структур платформенных и геосинклинальных областей. Тр. ГИН АН СССР, вып. 29, 1960, 91 с.
- Косыгин Ю. А., Швембергер Н. А., Никитина Ю. П. О некоторых закономерностях расположения соляных куполов Южной Эмбы. Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 23, вып. 2, 1948, с. 63—66.
- Кунин Н. Я., Сапожников Р. Б. Строение юго-восточной окраины Прикаспийской впадины. «Геотектоника», 1965, № 6, с. 91—94.
- Кухмазов У. А. и др. Комплексные геофизические исследования в Прикаспийской впадине и ее обрамлениях и основные направления геофизических работ. «Нефтегазовая геология и геофизика», 1971, № 2, с. 40—43.
- Латынина Л. А. О существовании конвекционных течений в оболочке Земли. Изв. АН СССР, серия геофиз., 1958а, № 3, с. 391—397.
- Латынина Л. А. Тепловая конвекция в оболочке Земли. Изв. АН СССР, серия геофиз., 1958б, № 9, с. 1085—1098.
- Лебедева Н. Б. Моделирование процесса образования диапировых куполов. «Советская геология», сб. 54, 1956, с. 163—175.
- Липатова В. В. О германском типе триаса в Прикаспийской впадине. Изв. АН СССР, серия геол., 1967, № 1, с. 58—67.
- Лучицкий И. В., Бондаренко П. М. Тектоническое моделирование в искусственном магнитном поле. Докл. АН СССР, т. 174, № 5, 1967, с. 1173—1176.
- Любимова Е. Л. О температурном градиенте в верхних слоях Земли и возможном объяснении слоя пониженных скоростей. Изв. АН СССР, серия геофиз., 1959, № 12, с. 1861—1863.
- Люстик Е. Н. Условия подобия при моделировании тектонических процессов. Докл. АН СССР, нов. серия, т. 64, № 5, 1949, с. 661—664.
- Магницкий В. А. О волноводах в земной коре и подкоровом слое. Бюлл. МОИП, нов. серия, т. 63, отд. геол., т. 33, вып. 4, 1958, с. 15—23.
- Магницкий В. А. Внутреннее строение и физика Земли. М., «Недра», 1965, 379 с.
- Магницкий В. А., Хорошева В. В. К вопросу о волноводе в оболочке земли и его физической природе. Докл. АН СССР, т. 135, № 2, 1960, с. 305—307.
- Мехтеев Ш. Ф., Снарский А. Н. Экспериментальная проверка условий образования диапировых складок. «Советская геология», 1941, № 6, с. 108—111.
- Михайлов Н. В., Ребиндер П. А. О структурно-механических свойствах дисперсных и высокомолекулярных систем. «Кolloидный журнал», т. 17, № 2, 1955, с. 107—119.
- Неволин Н. В. О природе гравитационных и магнитных аномалий центральных и восточных районов Русской платформы. Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957, № 8, с. 1069—1072.
- Неволин Н. В. Тектоника Западного Казахстана и перспективы его нефтегазоносности. М., Гостоптехиздат, 1961, 316 с.
- Неволин Н. В. Общие черты глубинного геологического строения Западного Казахстана. М., «Недра», 1965, 134 с.
- Неволин Н. В., Блохин П. А., Липовецкий И. А., Глубинное геологическое строение Прикаспийской впадины. В сб. «Материалы по тектонике Нижнего Поволжья». Под ред. И. О. Брова. Л., Гостоптехиздат, 1962, с. 82—89.
- Никонова Н. А. Основные черты тектоники зоны северо-западного ограничения Прикаспийской впадины в свете геофизических (сейсмических) данных. Уч. зап. Саратов. ун-та, вып. геол., т. 74, 1960, с. 299—302.
- Никитин С. П. Особенности геологического строения и перспективы газо-нефтегазоносности докунгурских (подсолевых) отложений Прикаспийской впадины. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. канд. г.-м. наук. М., 1967, 27 с.
- Осокина Д. Н. Пластические и упругие низкомодульные оптически активные материалы для исследования напряжений в земной коре методом моделирования. М., Изд-во АН СССР, 1963, 196 с.
- Павлов В. П., Виноградов Г. В. Фотопластостикозиметр. Аннотация работ по химии и технологии нефти и газа за 1956 год. М., Изд-во АН СССР, 1957.

Паркер Т. Д., Мак-Доуэлл А. Н. Экспериментальное изучение соляно-купольной тектоники. В кн. «Вопросы экспериментальной тектоники». Перевод с англ. И. В. Кирилловой и А. А. Сорского. М., изд-во иностр. лит., 1957, с. 9—136.

Проблемы тектонофизики, т. 1. Тр. Первого Всес. тектонофизического совещ., под ред. В. В. Белоусова, М. В. Гзовского, 1957. М., Госгеолтехиздат, 1960, 364 с.

Рамберг Ханс. Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. Перевод с англ. Е. Н. Люстиха. Ред. В. В. Белоусов. «Мир», 1970, 223 с. Послесловие В. В. Белоусова, с. 214—223.

Ромашов А. А. Локальные структуры юго-восточной прибрежной части Прикаспийской впадины. Изв. вузов, «Геология и разведка», № 9, 1971, с. 150—152.

Ромашов А. А. Особенности тектоники и локальные структуры юго-восточной части Прикаспийской впадины. Изв. вузов, «Геология и разведка», № 4, 1972, с. 25—34.

Рябинкин Л. А. и др. Геологические результаты глубинных исследований МРИП на востоке Прикаспийской впадины. В сб. «Поиски нефти и газа в соляно-купольных областях». Тр. Ин-та нефтехим. и газовой промышленности, вып. 90. М., «Недра», 1970, с. 97—107.

Соколин Х. Г. Некоторые вопросы методики поисково-разведочных работ в северо-западной части прибрежной зоны Прикаспийской впадины. Тр. Нижне-Волжского научно-иссл. ин-та геологии и геофизики, вып. 2, М., «Недра», 1964, с. 183—196.

Соколов В. Л. Некоторые черты унаследованности в развитии структуры осадочного покрова юго-востока Русской платформы. В сб. «Материалы по тектонике Нижнего Поволжья», под ред. И. О. Броды. Л., Гостоптехиздат, 1962, с. 137—148.

Соколов В. Л. Погребенные тектонические планы юго-востока Русской платформы. В кн. «Вопросы сравнительной тектоники древних платформ», М., «Наука», 1964, с. 100—113.

Соколов В. Л. О направлении и выборе объектов поисково-разведочных работ на газ в бортовой зоне Прикаспийской впадины. Тр. Нижне-Волжского научно-иссл. ин-та геологии и геофизики, вып. 3, М., «Недра», 1965, с. 88—97.

Соколов В. Л. Проблемы газоносности Прикаспийской впадины. Тематический научно-технический обзор. М., ВНИИЭ, 1970, 55 с.

Соколов В. Л., Буш Э. А., Кричевский Н. Г. О структуре подсолевого полезою Прикаспийской впадины. Докл. АН СССР, т. 162, № 6, 1965, с. 1370—1373.

Соколов В. Л., Кричевский Г. Н. Об особенностях солянокупольной тектоники Прикаспийской впадины в связи с разведочными работами на газ и нефть. В сб. «Условия образования и особенности нефтегазоносности солянокупольных структур». Киев, «Наукова Думка», 1966, с. 146—153.

Соловьев Б. А. Особенности солянокупольной тектоники в районе среднего течения р. Урал. «Геотектоника», 1966а, № 3, с. 130—133.

Соловьев Б. А. Тектоническое положение Хобдинского участка в общей структуре Прикаспийской впадины и перспективы его нефтегазоносности. Автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. г-м. наук, М., 1966б.

Соловьев Б. А. Тектоника внутренних районов Прикаспийской впадины. Тр. Ин-та нефтехим. и газовой промышленности, вып. 90. М., «Недра», 1970, с. 216—224.

Соловьев Б. А., Голов А. А. О генетических типах соляных структур в Прикаспийской впадине и перспективах их нефтегазоносности. «Геология нефти и газа», 1966а, № 4, с. 17—22.

Соловьев Б. А., Голов А. А. Методика изучения геологического строения и нефтегазоносности центральной части Прикаспийской впадины. «Нефтегазовая геология и геофизика», 1966б, № 10.

Соловьев Б. А., Голов А. А., Кожевников И. И. О морфологии соляных структур центральной части Прикаспийской впадины. Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 42, вып. 2, 1967, с. 26—31.

Сычева-Михайлова А. М. О механизме тектонических процессов в условиях инверсии плотности горных пород. «Геотектоника», 1969, № 4, с. 47—60.

Сычева-Михайлова А. М. Моделирование процесса формирования дипировых куполов и астенолитов с помощью центрифуги. «Геотектоника», 1970, № 1, с. 30—40.

Сычева-Михайлова А. М. Некоторые закономерности механизма формирования соляных структур в Прикаспийской впадине. Сб. «Вопросы геономии. Кора и верхняя мантия Земли». Под ред. В. В. Белоусова, А. В. Вихерта. М., изд-во МГУ, 1972а, с. 146—168.

Сычева-Михайлова А. М. Моделирование процесса формирования соляных структур на твердых пластичных материалах с применением центрифуги. В сб. «Тектоника Сибири», т. 5. (Принципы тектонического районирования. Тектоническая терминология и систематика. Тектонические эксперименты.) М., «Наука», 1972б, с. 287—292.

Фоменко К. Е. Соленосные бассейны мира в свете строения земной коры. Бюлл. МОИП, нов. серия 74, отд. геол., т. 66, вып. 3, 1971, с. 152—153.

Хайн В. Е. О диапирах и диапиризме. Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 16, вып. 2, 1938.

Чарыгин М. М. и др. Тектоническое строение и история развития Прикаспийской впадины и смежных областей в связи с вопросами нефтегазоносности. М., Гостоптехиздат, 1958, 407 с.

Шатский Н. С. Основные черты строения и развития Восточно-Европейской платформы. Сравнительная тектоника древних платформ. Изв. АН СССР, серия геол. 1946, № 1, с. 5—62.

Шванк О. А. Некоторые результаты гравитационной съемки юго-востока Европейской части СССР. Тр. Нижне-Волжского научно-иссл. ин-та геологии и геофизики. М., «Недра», 1964.

Шеерсон Б. Л. О применении теории подобия при тектоническом моделировании. Тр. Ин-та теоретической геофизики, т. 3. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1947а, с. 94—106.

Шеерсон Б. Л. К вопросу о механизме образования соляных куполов. Изв. АН СССР, серия геогр. и геофиз., т. 11, 1947б, № 6, с. 497—502.

Эвентов Я. С. Западная часть Прикаспийской впадины. В сб. «Очерки по геологии СССР (по материалам опорного бурения)». Тр. ВНИГРИ, нов. серия, вып. 96. Л., Гостоптехиздат, 1956, с. 28—56.

Эвентов Я. С. Результаты работы ВНИГНИ в Западной части Прикаспийской впадины. В кн. «Геология и нефтегазоносность юго-восточных районов Русской платформы». Л., Гостоптехиздат, 1958, с. 101—119.

Эвентов Я. С. История формирования и особенности тектоники западной части Прикаспийской впадины в связи с оценкой перспектив нефтегазоносности. Материалы по тектонике Нижнего Поволжья, под ред. И. О. Брова. Л., Гостоптехиздат, 1962, с. 62—81.

Эвентов Я. С. и др. Некоторые закономерности размещения нефтяных и газовых месторождений в юго-восточной части Русской платформы. В сб. «Геологическое строение юго-восточных районов Русской платформы и перспективы их на нефть и газ». Тр. ВНИГНИ, вып. 50. М., «Недра», 1967.

Яншин А. Л. О погребенных герцинидах к востоку от Каспийского моря. Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 20, вып. 5—6, 1945, с. 30—51.

Яншин А. Л. О погружении к югу Уральской складчатой системы и тектонической природе Южно-Эмбенского поднятия. Бюлл. МОИП, отд. геол., т. 30, вып. 5, 1955, с. 51—73.

Arrhenius Sv. Zur Physik der Salzlagerstätten. Meddel. K. Vetenskabsakademiens, Nobelinstitut. Bd. 2, N 20, 1912, 25 p.

Belousov V. V. Tectonophysical investigations. Bull. Geol., Soc. Amer., vol. 71, N 8, 1960, p. 1255—1269.

Belousov V. V. Experimental geology. Scient. Amer., vol. 204, N 2, 1961, p. 96—104.

Benard H. Les Tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. Revue générale des Sciences pures et appliquées et bulletin, sc. 11, N 23—24, 1900, p. 1261—1271; 1309—1328.

Biot M. A. Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis. Bull. Geol. Soc. Amer., vol. 72, N 11, 1961, p. 1595—1620.

Biot M. A. Theory of Stability of Multilayered Continua in finite anisotropic elasticity. Franklin Inst. Journal, vol. 276, N 2, 1963a, p. 123—153.

Biot M. A. Stability of Multilayered Continua including the effect of gravity and viscoelasticity. Franklin Inst. Journal, vol. 276, N 3, 1963b, p. 231—252.

Biot M. A. and Ode H. Theory of gravity instability with variable overburden and compaction. Geophysics, vol. 30, N 2, 1965, p. 213—227.

Danes Z. F. Mathematical formulation of salt dome dynamics. Geophysics, vol. 29, N 3, 1964, p. 414—424.

Dobrin M. B. Some quantitative experiments on fluid salt dome model and their geological implications. Trans. Amer. geophys. Union, vol. 22, N 2, 1941, p. 528—542.

Hubert M. R. Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 48, N 10, 1937, p. 1459—1520.

Murray G. E. Geology of Atlantic and Gulf coastal province of North America. Harper and Bros., New York, 1961, 692 p.

Murray G. E. Salt structures of Gulf of Mexico basin—a Review. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., vol. 50, N 3, pt. I, of II, 1966, p. 439—478.

Nettleton L. L. Fluid mechanics of Salt domes. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., vol. 18, N 9, 1934, p. 1175—1204.

Nettleton L. L. Recent experimental and geophysical evidence of mechanics of salt dome formation. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., vol. 27, N 1, 1943, p. 51—63.

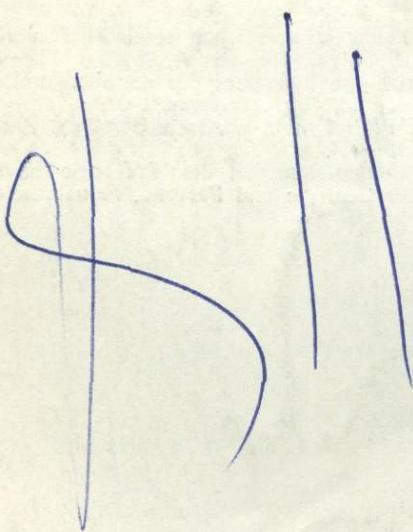
Nettleton L. L., Elkins T. A., Geologic models made from granular materials. Trans. Amer. Geophys. Union, vol. 28, 1947, p. 451—466.

- Parker T. J. and Mc Dowell A. N. Model studies of salt dome tectonics Amer. Assoc. Petrol. geol. Bull., vol. 39, N 12, 1955, p. 2384—2470.
- Ramberg H. Experimental study of gravity tectonics by means of centrifuged models. Bull. Geol. Inst., Univ. of Uppsala, vol. 42, N 1—6, 1963, p. 1—97.
- Ramberg H. Experimental models of fold mountains, Geol. Foren Stockholm Forh., vol. 87, N 4, 1965, p. 484—491.
- Ramberg H. The Scandinavian Caledonides as studied by centrifuged dynamic models. Bull. Geol. Inst. Univ. of Uppsala, vol. 43, N 4—5, 1966, p. 3—72.
- Ramberg H. Gravity, Deformation and the Earth's Crust, as studied by centrifuged models. London an New York, Academic Press., 1967, 214 p.
- Ramberg H. Fluid dynamics of layered systems (in the field of gravity on theoretical basis for certain global structures) and isostatic adjustment. Physics Earth and Planetary interiors, vol. 1, N 2, 1968, p. 63—87.
- Rayleigh Lord. Investigation of the character of the equilibrium of an incompressible heavy fluid of variable density. Scientific Papers, Cambridge at the University press, 1900, p. 200—207.
- Rayleigh Lord. On Convection Currents in a Horizontal Layer of Fluid, when the Higher Temperature is on the under Side. Philosophical Magazine, ser. 6, vol. 32, 1916, p. 527—546.
- Seling F. A theoretical prediction of Salt dome patterns. Geophysics, vol. 30, N 4, 1965, p. 633—643.
- Seling F. and Wermund E. G. Families of salt domes in the Gulf Coastal Province. Geophysics, vol. 31, N 4, 1966, p. 726—740.
- Taylor G. J. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. Proc. Roy. Soc., vol. 201, ser. A, 1950, p. 192—196.
- Trusheim F. Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands. Z. Deut. Geol. Ges., Bd. 109, Hannover, 1957, p. 111—158.
- Trusheim F. Mechanism of salt migration in northern Germany. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., vol. 44, N 9, 1960, p. 1519—1540.
- Wunderlich H. G. Inverse Dichtevertteilung in der Erdkruste-Ursachen und tektonische Auswirkungen. Neues Jahrb. für Geologie und Paläont., Monatschäfte, Hft. 1, Stuttgart, 1967, p. 1—27, alb. 7.

595

1 р. 26 к.

2



НЕДРА · 1973