

В. П. Якуцки

**Г**ЕОЛОГИЯ  
**Т**ЕПЛИЯ

В. П. Якушкин

# Геология Пелля



Издательство „НЕДРА“  
Ленинградское отделение  
Ленинград · 1968

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Геология гелия. Якуцени В. П. Л., Недра, 1968 г., стр. 232.

В книге изложены сведения об основных свойствах гелия, его изотопном составе и методах аналитического исследования. Систематизирован материал по распространенности гелия в природе. Рассмотрены источники гелия на Земле, его миграция в недрах и явление диссипации гелия в космос. Приведены ориентировочные расчеты баланса гелия на Земле.

Охарактеризована гелиеносность природных газов различных видов естественных газопроводов — свободных газовых скоплений, газов, растворенных в подземных водах и нефтях, выделяемых вулканами, фумаролами и т. п., а также газов, свободно выделяющихся из шахт, рудников и соляных копей. Дана классификация природных газов по степени их гелиеносности.

На основе анализа геологических и геохимических закономерностей распределения гелия в осадочной толще коры Земли определено размещение зон регионального гелиенакопления, выделены гелиевые геохимические провинции. Рассмотрены условия формирования месторождений гелиеносных газов и их промышленные оценочные параметры. Приведены генетическая и промышленная классификация месторождений гелиеносных газов, намечены ведущие промышленные типы гелиевых месторождений. Разработаны поисковые геологические критерии на гелиевые месторождения, намечены методы их поисков и оценена специфика разведки гелиевых месторождений.

Книга рассчитана на широкий круг геологов и геохимиков, работающих в области геологии нефти и газа, а также геологов, занимающихся поисками месторождений радиоактивных руд. Табл. 64, илл. 32, библи. 249.

Гелий является одним из весьма ценных в промышленном отношении, но очень рассеянным на Земле элементом. Немногие страны мира располагают промышленными запасами гелиевого сырья.

В настоящее время гелий добывается только в трех странах мира — в СССР, США и Канаде, причем со все возрастающими темпами. Единственным источником рентабельного получения гелия в промышленных масштабах являются залежи природных газов, обогащенные гелием.

Уникальные физико-химические свойства гелия обеспечили ему широкое применение в технике, с каждым годом области технического применения гелия расширяются, но одновременно с этим резко сокращаются запасы гелиеносных газов в связи с бурным ростом добычи природного газа без извлечения из них гелия.

Одной из основных проблем, стоящих перед геологами, занимающимися исследованием этого вида сырья, является тщательная оценка его ресурсов, как промышленных, так и прогнозных, чтобы вовремя принять все необходимые меры по его охране. Достоверная оценка прогнозных запасов гелия может быть сделана только на основе исследования закономерностей образования и размещения месторождений гелиеносных газов, поэтому изучение вопросов геологии гелия представляется весьма актуальным.

В связи с тем, что многие вопросы геологии гелия, в частности такие важные, как закономерности распределения гелия в осадочной толще, генетическая классификация

2-9-2  
573а-67

**ВЕРА ПРОКОФЬЕВНА ЯКУЦЕНИ**

**ГЕОЛОГИЯ ГЕЛИЯ**

Научный редактор В. А. Соколов

Ведущий редактор Т. М. Пономарева. Технический редактор Н. П. Старостина

Корректоры В. Н. Михалевич, Е. А. Смирнова

Сдано в набор 11/1 1968 г. Подписано к печати 14/III 1968 г.  
Формат 60 × 90<sup>1/16</sup>. Бумага № 2. Печ. л. 14<sup>1/2</sup>. Усл. л. 14,5. Уч.-изд. л. 15,91.  
Индекс 1-4-1-Л. Тираж 2000 экз. М-18097. Договор № 29. Заказ № 1426.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение.  
Ленинград, Ф-2, ул. Ломоносова, 22.  
Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник». Главполиграфпрома.  
Комитета по печати при Совете Министров СССР. Московский пр., 91.  
Цена 1 р. 13 к.

гелиевых месторождений, их промышленные оценочные параметры и т. п., обсуждаются впервые, по-видимому, неизбежными окажутся некоторые недочеты в решении отдельных вопросов, поэтому автор будет признателен читателям за все замечания и предложения, которые они сочтут необходимым сделать и сообщить по адресу: Ленинград, Д-104, Литейный пр., 39, ВНИГРИ.

Автор считает приятным долгом выразить признательность за научное сотрудничество В. В. Тихомирову, А. Н. Воронову, Н. Л. Петровской, А. Х. Махмудову и другим товарищам, работающим совместно с ним по исследованию геологии гелия. Автор благодарен также В. А. Соколову, Н. И. Полевой и М. С. Гуревичу за ценные критические замечания.

## Глава I

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЗУЧЕННОСТИ ГЕОЛОГИИ ГЕЛИЯ

Выделяются следующие четыре этапа исследований гелия, связанных с изучением его распространения (нахождения) и геологии.

I период — 1869—1914 гг. — ранний период исследований гелия, эпоха его открытия на Солнце (1869 г.) и затем на Земле (1895 г.). В указанный период исследуются основные свойства этого газа, выявляется его взаимосвязь с урановыми минералами.

В 1905 г. Резерфорд обращает внимание на возможность использования гелия для определения возраста минералов, но многочисленные исследования содержания гелия в различных минералах показали его невысокую сохранность и, следовательно, затруднительность использования гелиевого метода в геохронологии.

II период — 1915—1935 гг. — это период становления и развития гелиедобывающей промышленности, связанной с дирижаблестроением, и интенсивного поиска гелия во всех технически развитых странах. Начинается широкое исследование распространения гелия, выясняется резкая ограниченность его сырьевой базы в мире.

III период — 1936—1949 гг. — период депрессии. Использование гелия в широких масштабах для заполнения дирижаблей прекратилось в связи с развитием самолетостроения. Новые отрасли использования больших количеств гелия не были известны. Промышленный интерес к увеличению прироста запасов гелия значительно снизился, соответственно сократился и объем работ по поискам гелиеносных газов во всех странах, в том числе и в СССР. В эти годы продолжается исследование лишь возможностей применения гелиевого метода для определения возраста минералов и пород.

IV период — с 1950 г. и поныне — современный период, эпоха нового наращивания темпов развития гелиевой промышленности и постепенного разворота геологопоисковых работ. Заинтересованность в гелии ведущих и стратегических отраслей промышленности стимулирует расширение научно-исследовательских работ в области геологии гелия. К странам, располагающим гелиевыми ресурсами, т. е. к СССР, США и Канаде, лишь предположительно присоединяются отдельные африканские государства (Алжир, ЮАР).

Таковы основные этапы развития гелиедобывающей промышленности мира, а вместе с нею и изучения геологии гелия. Рассмотрим основные достижения в исследовании геологии гелия каждого из этих периодов.

## РАННИЙ ПЕРИОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛИЯ, ИСТОРИЯ ЕГО ОТКРЫТИЯ (1869—1914 гг.)

Своеобразным доказательством торжества научного мышления человека является открытие гелия, впервые обнаруженного на Солнце и лишь 27 лет спустя выявленного и исследованного на Земле.

Изучая химический состав газов солнечных протуберанцев с помощью спектрального анализа в 1868 г., француз Жансен и англичанин Локьер независимо друг от друга обнаружили в линейчатом спектре короны Солнца ярко-желтую линию, не совпадающую ни с линией натрия, на которую она похожа по цвету, ни с линиями каких-либо других элементов, известных на Земле. Этой линии, в отличие от желтых линий натрия  $D_1$  и  $D_2$ , был присвоен символ  $D_3$ . Спустя три года после открытия на Солнце спектра  $D_3$  Франкланд и Локьер с большой осторожностью высказали предположение, что желтую линию в спектре Солнца дают лучи какого-то раскаленного газа, неизвестного на Земле, который они предложили назвать гелием, что в переводе с греческого означает «солнечный». Локьер не исключал при этом, что гелий является всего лишь какой-то неизвестной на Земле модификацией водорода. Долгие годы ученые не вспоминали о существовании таинственного солнечного газа, и лишь изредка астрономы, наблюдая спектры далеких звезд и туманностей, обнаруживали в некоторых из них линию  $D_3$ , принадлежавшую гелию.

Время открытия гелия на Земле несколько более спорно. В 1881 г. итальянец Пальмиери, изучая состав газов, выделившихся при прокаливании твердых продуктов взгона газовых струй на краях кратера Везувия, обнаружил в их спектре эту линию  $D_3$ . Пальмиери публикует сообщение об открытии им гелия на Земле в том же 1881 г., но допускает неточности в описании проведенного опыта, в связи с чем не вызывает доверия к своему наблюдению со стороны ученых. К тому же попытки Назини и Андерлини обнаружить гелий в продуктах извержения вулкана привели их к выводу о невозможности в условиях работ Пальмиери спектроскопически обнаружить гелий [Фастовский, 1940].

Лишь спустя 14 лет после опубликования работы Пальмиери гелий был выделен и изучен на Земле английским физико-химиком Рамзаем, которому по праву и принадлежит честь открытия гелия на Земле.

Вскоре гелий нашли во многих природных источниках. В воздухе он был обнаружен в том же 1895 г. Кайзером, причем в очень малом количестве, примерно в 2000 раз меньшем, чем аргон. Неясным, хотя и весьма интересным для исследователей оставался вопрос, почему наиболее активно выделяют гелий минералы, содержащие уран? Рамзай предположил, что уран является именно тем элементом, с которым гелий находится в минералах в соединении. Вместе

с Траверсом он проделал множество опытов с целью установить, существует ли определенное соотношение между весовым количеством урана и содержанием гелия, но безуспешно. Также остались безуспешными и попытки соединить гелий с ураном. Опыты пришлось прекратить, так и не разрешив этого вопроса.

Мысль о генетической взаимосвязи урана и гелия была высказана впервые уже другими учеными — Резерфордом и Содди, предположившими, что  $\alpha$ -лучи состоят из атомов гелия. Однако доказательство этому было получено несколько позднее и опять-таки с помощью Рамзая. Разработав технику получения эманации радия в относительно чистом виде, Содди и Рамзай получили ее в количестве, достаточном для того, чтобы изучить ее свойства. При этих опытах они неожиданно обнаружили, что через несколько дней капиллярная трубка, заполненная эманацией, дает спектр гелия. Многократное повторение опыта позволило им с уверенностью заявить, что при распаде эманации радия образуется гелий. Резерфорд, получив подтверждение высказанному им ранее предположению об идентичности  $\alpha$ -лучей атомам гелия, простым, но убедительным опытом доказал, что  $\alpha$ -излучение есть не что иное, как поток ядер гелия. Так была выяснена не только природа гелия, но и его генетическая связь — через радий — с урановыми минералами.

Наиболее тщательное исследование содержания гелия в различных минералах было выполнено Стреттом (1908—1910 гг.) в связи с предложением Резерфорда (1905 г.) использовать данные о содержании гелия в составе минералов для определения их возраста.

Собранный в результате указанных исследований фактический материал показал значительное расхождение между количественными соотношениями гелия и радиоактивных элементов в минералах. Это несоответствие Стретт объяснил в 1909 г. утечкой гелия [Лукашук, 1933].

В природных газах, находящихся в толщах горных пород, гелий был впервые обнаружен в 1898 г. в составе вулканических газов Италии благодаря исследованиям Назини, Андерлини и Сальвадори. Вначале он был обнаружен ими в fumarольных газах, затем и в углеводородных газах Северной Италии.

В США гелий обнаружили Кэди и Макфарланд в 1905 г., когда они анализировали в Канзасском университете пробы из скважин, давших невоспламеняющийся газ. При этом выяснилось, что газ месторождения Декстер в штате Канзас содержит около 2% гелия.

За рубежом в эти годы уделяется внимание главным образом изучению вопросов нахождения и распространения гелия и его генетической связи с урановыми минералами, а в России В. И. Вернадский обращает внимание на другую сторону научного использования данных о гелии. В 1911 г. на Втором Менделеевском съезде в Петербурге в докладе «О газовом обмене земной коры» он указывает на потерю гелия вместе с водородом Землей в космос и предлагает обратить внимание ученых на совершенно неизученные, но весьма интересные

вопросы газового обмена Земли, а также на ее гелиевый баланс. Этот газовый обмен земной коры В. И. Вернадский в дальнейшем назвал «дыханием Земли». Содержание гелия в составе природных газов России в эти предвоенные годы практически не изучалось.

### ЭПОХА ДИРЖАБЛЕСТРОЕНИЯ И СВЯЗАННОГО С НИМ ПЕРИОДА ИНТЕНСИВНОГО ПОИСКА ГЕЛИЯ (1915—1935 гг.)

Первыми исследователями гелия были химики и физики. Выявленные специфические его свойства привлекли к нему внимание ученых, но количества гелия, необходимые для экспериментальных исследований, были незначительны, а промышленность никакого интереса к этому виду сырья до 1915 г. не проявляла. Поэтому немногочисленные работы, посвященные исследованиям содержания гелия в минералах и природных газах, выполненные Стреттом, Рамзаем, Муре, Панетом и другими исследователями, могут быть отнесены лишь к началу изучения геологии гелия.

Впервые в широких масштабах гелий попытались использовать в годы первой мировой войны для заполнения дирижаблей. Заинтересованные в гелии воюющие страны начали активные поиски наиболее пригодного для его получения сырья. Мак Леннах исследует в 1915 г. содержание гелия в природных газах Канады, Англии и Новой Зеландии. На территории Канады были обнаружены высокие концентрации гелия в провинции Онтарио, в Англии и Новой Зеландии поиски гелия остались безуспешными.

В наиболее выгодном положении оказались США, на территории которых уже с 1905—1907 гг. благодаря исследованиям Кэди и Макфарланда была выявлена высокая гелиеносность природных газов целого ряда месторождений, особенно тех из них, которые располагались в штате Канзас. В 1917 г. Горное бюро США приступило к строительству двух первых опытно-промышленных установок для извлечения гелия из природных газов.

На территории Западной Европы, несмотря на усиленные поиски гелия, обнаружить его в достаточных количествах для организации добычи из природных газов не удалось. Результаты выполненных многочисленных исследований содержания гелия в составе природных газов были обобщены в 1921 г. американским геологом Роджерсом в монографии «Гелиеносные природные газы». Этой работой и было положено начало всестороннему изучению геологии гелия. В своей книге Роджерс привел не только сводку всего накопившегося к 1921 г. материала, но дал также и обзор различных теорий происхождения гелия в составе природных газов, не утративший своего научного значения и ныне.

В СССР работы по поискам гелия были начаты в тех же 20-х годах текущего столетия. Вначале ими ведал Гелиевый комитет при Академии наук СССР, затем Научно-технический совет по гелию при Госплане СССР.

Планомерное исследование гелиеносности природных газов было начато Радиевым институтом Академии наук СССР, затем продолжено в 30-х годах трестом Гелиегазразведка. В результате выполненных исследований начинают публиковаться первые работы по изучению гелиеносных газов у нас в стране. В частности, в сборнике статей «Природные газы СССР» под редакцией И. М. Губкина, А. Е. Ферсмана и Б. С. Швецова [1935] наряду с данными о геохимии природных газов СССР приводятся и сведения о содержании гелия, его распространении, геохимии и добыче.

Проблемам изучения гелия посвящают свои отдельные работы А. Е. Ферсман, В. Г. Хлопин, В. В. Белоусов, ряд исследований проводят А. И. Лукашук, А. А. Черепенников, В. А. Соколов, Э. К. Герлинг, В. П. Савченко и др.

На основе собранного фактического материала по содержанию гелия в составе природных газов СССР и мира изучаются условия нахождения гелия в земной коре, закономерности его распределения, степень гелиеносности природных газов, различных по генезису, продолжается исследование содержания гелия в минералах, рассматриваются вопросы формирования залежей гелиеносных газов. Среди наиболее интересных работ периода 20—30-х годов следует назвать статьи А. И. Лукашука [1928, 1933], В. В. Белоусова [1934], В. П. Савченко [1935], В. А. Соколов в книге «Гелий и другие редкие газы» [1933] предлагает метод газовой и, в частности, гелиевой съемки как метод прямых поисков газонефтяных и гелиевых месторождений.

К этому времени становится ясным, что гелий не может давать самостоятельных скоплений в недрах, что он всегда является примесью к природным газам любого иного генезиса, что он накапливается в результате процессов радиоактивного распада в недрах, кроме того, выясняется частая приуроченность наиболее высоких концентраций гелия к азотным по составу газовым залежам. Почти во всех работах отмечается приуроченность залежей гелиеносных газов к небольшим глубинам. В. П. Савченко обращает внимание на значительную роль подземных вод в формировании залежей гелиеносных газов, а в 1935 г. он же предлагает использовать данные о содержании гелия и аргона в составе газов, растворенных в водах, для определения возраста подземных вод.

В этот же период выходит много работ, посвященных гелию, и за рубежом, но подавляющее их большинство посвящено исследованию содержания гелия в различных минералах и его связи с радиоактивностью пород. Наглядную характеристику направления исследовательских работ этого периода дает библиография по гелию, изданная Виллером и Свенартоном [Wheller, Swenarton, 1952]. В библиографии собраны сведения о научной и технической литературе, опубликованной за период от года открытия гелия в спектре солнечной хромосферы, т. е. от 1868 г., до января 1947 г.

## ПЕРИОД ДЕПРЕССИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ГЕОЛОГИИ ГЕЛИЯ (1936—1949 гг.)

К 1935 г. успешно развивающееся самолетостроение вытеснило дирижабли из гражданского воздухоплавания. Промышленный интерес к увеличению прироста запасов гелия значительно снизился, соответственно сократился и объем геологопоисковых работ по поискам гелиеносных газов во всех странах, в том числе и в СССР.

За рубежом в эти годы уделяется основное внимание исследованию изотопии гелия и его космической распространенности, в частности исследуется содержание гелия в различных метеоритах (Панет, Харлей, Гудман, Койпер, Юри, Браун и др.).

В СССР среди наиболее полных исследований по геологии и геохимии гелия этого периода следует назвать выпущенные в 1940 г. работы М. С. Горюнова и А. Л. Козлова «Вопросы геохимии гелиеносных газов и условия накопления гелия в земной коре» и А. Л. Козлова «Вопросы геохимии природных газов и генезис гелиевых месторождений». В них подводятся итоги всех накопленных к тому времени данных по вопросам геологии гелия; основное внимание уделяется при этом исследованию геологических условий залегающих гелиеносных газов и их происхождению.

Э. К. Герлинг в эти годы начинает исследование по изучению вопросов диффузии гелия в минералах и породах, выясняет зависимость величин потери гелия от плотности упаковки кристаллических решеток минералов и теплот диффузии.

## ПЕРИОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОЛОГИИ ГЕЛИЯ С 1950 г. ДО НАСТОЯЩЕГО ВРЕМЕНИ

В США, основной гелиедобывающей стране капиталистического мира, за 1929—1942 гг. было извлечено всего 4,7 млн. м<sup>3</sup> гелия. Постепенно области применения гелия в промышленности расширялись, и за 1947—1949 гг. было добыто 16,5 млн. м<sup>3</sup> гелия. Темпы роста добычи гелия в США постепенно нарастали, и уже в 1960 г. было добыто 18,2 млн. м<sup>3</sup> гелия. Соответственно с ростом потребления гелия растет и внимание геологов к приросту его запасов. В США начиная с 1950 г. систематически выполняются газоаналитические работы по изучению гелиеносности природных газов этой страны с целью выявления новых запасов гелиевого сырья.

В четырех бюллетенях Горного бюро США за 1951, 1958, 1961 и 1964 гг. Андерсоном, Хинсоном, Буном, Муннерлином и Миллером приводятся данные по составу природных газов всех опробованных на гелий газовых источников более 5 тыс. анализов природных газов.

Выполняется целый ряд работ по изучению геологии инертных газов, и в первую очередь исследуется взаимосвязь между радиоактивностью пород и гелиеносностью природных газов. Проводится изучение гелиеносности природных газов Западной Канады, Африки,

где обследуются высокогелиеносные газы горючих источников Танганьики и рудников Витватерсранда, а также других стран.

В СССР в этот период усиления изучения геологии гелия опубликована работа А. Л. Козлова [1950], в ней автор рассматривает вопросы формирования гелиевых месторождений. В. П. Савченко [1958] публикует работу, в которой обращает внимание на возможность использования данных о содержании инертных компонентов в составе газов для суждения о происхождении и формировании нефтегазовых месторождений. Имеется целый ряд и других работ, в той или иной мере затрагивающих вопросы геологии гелия [Флоренский, 1956 а, б]. В 1963 г. была опубликована работа автора «Закономерности формирования залежей гелиеносных газов».

К настоящему времени относительно разработанными оказались вопросы образования гелия в недрах, условий его нахождения, а также использования данных о содержании гелия в породах и минералах для определения их абсолютного возраста. Однако остается ряд неясностей в вопросах закономерностей гелиенакопления в недрах, формирования залежей гелиеносных газов и их генетических типов. Не разработаны вопросы промышленной характеристики гелиевых месторождений. Этим и другим наиболее слабо изученным вопросам геологии гелия уделено основное внимание в данной работе.

## СВОЙСТВА ГЕЛИЯ И МЕТОДЫ ЕГО АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ

### § 1. СВОЙСТВА ГЕЛИЯ

Гелий входит в нулевую группу периодической системы элементов Д. И. Менделеева, в которой находятся также неон, аргон, криптон, ксенон и радон. Все они в обычных земных условиях — газы, причем один из них — радон — радиоактивный, с периодом полураспада 3,823 суток. Группа этих газов носит много названий — инертные, недействительные, безвалентные, редкие, благородные. Ниже мы будем называть их инертными. Редкими эти газы не следует называть, так как содержание аргона в воздухе достаточно велико и составляет около 1%, а концентрации гелия в составе природных газов достигают в ряде случаев 3—10% и более. Инертными, недействительными эти газы названы в связи с тем, что они не дают соединений с ионной или ковалентной связями.

Гелий — одноатомный инертный газ без цвета и запаха, его инертность обусловлена насыщенностью внешней электронной оболочки, предельно замкнутой и максимально прочной. Многолетние попытки исследователей получить химические соединения гелия остались практически безуспешными. Лишь только спектральными методами была доказана возможность образования соединений гелия с атомом ртути. Энергия диссоциации такого соединения крайне мала, для  $\text{Hg} \cdot \text{He} = 3,01 \cdot 10^{-3}$  эв.

Интересно отметить, что для более тяжелых инертных газов была выявлена возможность получения как двухатомных молекул ( $\text{Ar}_2$ ,  $\text{Kr}_2$ ,  $\text{Xe}_2$ ), так и образования соединений разнородных атомов ( $\text{NeAr}^+$ ,  $(\text{ArKr})^+$ ,  $(\text{ArXe})^+$  и  $(\text{KrXe})^+$ , а также их соединений с ртутью с более высокой энергией диссоциации, чем для гелия. Среди химических соединений тяжелых инертных газов особенно ценными оказались кристаллогидраты аргона, криптона и ксенона. В этих соединениях атом инертного газа плотно окружен полярными молекулами воды или фенола, соединенными между собой, по-видимому, водородной связью.

Известно два природных изотопа гелия —  $\text{He}^3$  и  $\text{He}^4$ . Оба они состоят из ядра и двух электронов, но в отличие от  $\text{He}^4$  в ядре  $\text{He}^3$  имеются не два нейтрона на два протона, а только один. Ядро  $\text{He}^4$  очень устойчиво, энергия связи составляющих его частиц равна 28,11 Мэв. Ядро  $\text{He}^3$  значительно менее прочно. При облучении  $\text{He}^3$  дейтронами образуются  $\text{He}^4$  и водород с выделением огромного количества энергии — 18,3 Мэв на каждый элементарный акт. Энерге-

тический эффект этой реакции составляет более 100 млрд. кал на 1 кг прореагировавшего  $\text{He}^3$ .

Жидкий гелий удалось получить впервые в 1908 г. голландскому физику Камерлинг-Оннесу. При атмосферном давлении жидкий гелий кипит при температуре  $-4,216^\circ \text{K}$  ( $-268,9^\circ \text{C}$ ). Под давлением своих насыщенных паров он не переходит в твердое состояние вплоть до температуры абсолютного нуля, кристаллизуется лишь под давлением не ниже 25,27 ат (В. Кеезом, 1926). Твердый гелий — плотная бесцветная масса.

В области температур от 0 до  $2,186^\circ \text{K}$  жидкий гелий, состоящий из его тяжелого изотопа, проявляет весьма необычные свойства: резко увеличивается его теплопроводность (в  $10^8$  раз), в миллион раз уменьшается вязкость (с  $10^{-5}$  до  $10^{-11}$  лз и менее), резко увеличивается скорость распространения звука и т. д. Эти необычные свойства гелия в области температур, близких к абсолютному нулю, позволили открыть явления сверхтекучести и сверхпроводимости, нашедшие себе широкое научное и практическое применение. Гелий диамагнитен, что обусловлено замкнутым состоянием его электронной оболочки. Его магнитная восприимчивость отрицательная [Фастовский и др., 1964; Олик, 1962]. Сводка основных физических свойств инертных газов дана в табл. 1.

#### Сжимаемость гелия

Гелий лучше других газов следует идеальным газовым законам. При температуре  $21^\circ \text{C}$  он вместе с неоном менее сжимаем, чем идеальные газы ( $\frac{pV}{p_0V_0} > 1$ ), а Ar, Kr и Xe более сжимаемы ( $\frac{pV}{p_0V_0} < 1$ ).

В табл. 2 приведены данные о коэффициентах сжимаемости гелия  $z$  при различных температурах и давлениях.

$$z = \frac{pV}{RT},$$

где  $p$  — давление газа, ат;  $V$  — удельный объем газа при давлении  $p$ ;  $R$  — газовая постоянная;  $T$  — температура,  $^\circ \text{K}$ .

#### Вязкость гелия

При температуре  $20^\circ \text{C}$  вязкость гелия меняется от 196,14 до 195,88 мкпз при изменении давления от 1 до 50 ат. Вязкость гелия  $\eta$  с изменением давления изменяется незначительно. Так, при температуре  $25^\circ \text{C}$  и давлении 69 ат она составляет 199 мкпз\*, а при давлении 681,4 ат — 215,4 мкпз.

В значительно большей степени она меняется в зависимости от температуры (табл. 3). В интервале температур 4—1000 $^\circ \text{K}$  с точностью до 1% она может быть вычислена по эмпирическому уравнению Кеезома  $\eta = 5,023T^{0,647}$  мкпз.

\* 1 мкпз =  $10^{-8}$  г/(см·сек).



Таблица 1

Основные физические свойства нерадиоактивных инертных газов, азота и метана

Показатели	He	Ne	Ar	Kr	Xe	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
Атомный номер	2	10	18	36	54	7	—
Атомный (молекулярный) вес	4,003	20,183	39,944	83,80	131,30	28,016	16,042
Диаметр атомов, А	2,7	2,8	3,42	3,6	4,05	—	—
Плотность, г/л	0,17847	0,89994	1,78403	3,7493	5,8971	1,25	0,714
Относительный вес (к воздуху)	0,1381	0,695	1,3799	2,89	4,51	0,967	1,038
Критические параметры:							
температура, °С	—267,9	—228,7	—120	—62,5	+16,6	—147,0	—82,5
давление, ат	2,26	26,9	50	54,3	58,2	33,49	45,80
плотность, г/см <sup>3</sup>	0,069	0,4	0,4	0,7	0,9	0,311	0,162
Температура кипения (при 1 ат), °С	—268,94	—246,0	—185,9	—152,0	—108,8	—195,76	—161,49
Количество газа, образующегося при испарении 1 л жидкости, л	700,3	1341,1	784,0	643,6	518,9	—	442

Таблица 2

Коэффициент сжимаемости z гелия

P, ат	Температура, °С					
	0	50	100	200	400	600
1	1,0005	1,0004	1,0004	1,0003	1,0002	1,0001
10	1,0050	1,0043	1,0037	1,0028	1,0018	1,0013
50	1,0255	1,0212	1,0179	1,0139	1,0090	1,0065
100	1,0498	1,0445	1,0354	1,0277	1,0178	1,0129
200	1,0954	1,0801	1,0686	1,0540	1,0350	1,0255
300	1,1456	1,1231	1,0999	1,0772	1,0516	1,0378

Таблица 3

Вязкость гелия при высоких температурах [Фастовский и др., 1964]

t, °С	η, мкПа	t, °С	η, мкПа	t, °С	η, мкПа
0	186,0	200	267,2	500	375,0
50	206,5	250	287,5	600	407,0
100	228,1	300	305,5	700	437,0
150	247,5	400	341,5	800	466,0
				1000	524,0

При температуре 2,186° К гелий теряет вязкость, приобретая свойства сверхтекучей жидкости. Его вязкость падает ниже предела чувствительности метода измерения ( $<10^{-11}$  нз).

## Адсорбция гелия

Гелий при обычных условиях весьма мало адсорбируется. Именно это свойство и положено в основу отделения его от остаточной смеси инертных газов как при газовых анализах классическим (объемным) методом, так и при промышленном извлечении гелия из природных газов.

Сравнительные величины адсорбции гелия и азота на активированном угле даны в табл. 4.

Таблица 4

Адсорбция гелия и азота на 1 г угля (по Финкельштейну и Зайбелю, из книги В. Г. Фастовского, 1964)

t, °С	He, см <sup>3</sup>	N <sub>2</sub> , см <sup>3</sup>	t, °С	He, см <sup>3</sup>	N <sub>2</sub> , см <sup>3</sup>
—190	6,5	302	—86	0,45	92
—159	4,0	246	—75	0,30	70,8
—104	0,85	121	—48	0,20	48

На основании ряда экспериментов было установлено, что практически все металлы и минералы даже при комнатной температуре адсорбируют гелий в некоторых, хотя и очень небольших количествах.

Исследования, выполненные Канда [Кеезом, 1949], показали, что при очень низких температурах адсорбция гелия древесным углем весьма значительна. При температуре примерно 2° К и давлении 1 ат 4 атома углерода адсорбируют 1 атом гелия.

Кеезом и Шмидт [Кеезом, 1949], изучая адсорбцию гелия на тюрингенском стекле, обнаружили, что при температуре 1,2° К и равновесном давлении 17 мкбар адсорбировалось более  $40 \cdot 10^{-10}$  моль/см<sup>2</sup> гелия.

## Растворимость гелия

Основными средами, в которых гелий может растворяться в условиях земных недр, являются подземные воды, нефти и породы. Степень изученности растворимости гелия в этих средах неодинакова, лучше всего она известна для пресных вод при нормальных условиях, значительно хуже для подземных флюидов (воды, нефти), тогда как сведения о растворимости гелия в минералах и породах единичны.

Таблица 5

Растворимость гелия, аргона и азота в воде и растворах хлористого натрия при различных температурах и парциальном давлении газа 760 мм рт. ст., 1 см<sup>3</sup>/л [Мишина и др., 1961; Черепенников, 1958; Моррисон и др., 1954]

t, °C	Концентрация NaCl, г-экв/л									Коэффициент Сеченова, K
	0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	
Гелий										
10	9,1	7,6	7,0	6,4	5,9	5,4	5,0	4,6	3,9	0,074
20	8,6	7,2	6,6	6,0	5,5	5,0	4,6	4,2	3,6	0,077
30	8,4	6,9	6,4	5,8	5,3	4,8	4,4	4,0	3,3	0,080
40	8,4	6,9	6,3	5,8	5,2	4,7	4,3	3,9	3,2	0,084
50	8,6	7,1	6,4	5,8	5,3	4,8	4,3	3,9	3,2	0,085
60	9,0	7,4	6,7	6,0	5,5	4,9	4,4	4,0	3,3	0,087
70	9,4	7,6	6,9	6,2	5,6	5,1	4,6	4,1	3,3	0,090
80	9,6	7,7	7,0	6,3	5,7	5,1	4,6	4,1	3,3	0,093
90	10,2	8,2	7,3	6,5	5,9	5,3	4,7	4,2	3,4	0,096
100	11,0	8,8	7,9	7,0	6,3	5,6	5,0	4,4	3,5	0,099
110	12,0	9,5	8,5	7,5	6,7	5,9	5,3	4,7	3,7	0,102
120	13,0	10,2	9,2	8,1	7,2	6,3	5,6	5,0	3,9	0,104
130	14,5	11,3	10,0	8,8	7,8	6,9	6,1	5,4	4,2	0,107
140	16,0	12,4	11,0	9,6	8,5	7,5	6,6	5,8	4,5	0,110
150	17,5	13,4	11,9	10,4	9,2	8,0	7,1	6,3	4,8	0,113
160	19,0	14,5	12,8	11,1	9,8	8,5	7,5	6,6	5,6	0,116
Аргон										
10	41,6	29,8	—	20,8	—	14,6	—	10,2	7,0	0,155
20	33,4	24,4	—	17,8	—	13,0	—	9,4	6,9	0,137
30	28,2	20,9	—	15,5	—	11,5	—	8,5	6,3	0,130
40	25,0	18,7	—	14,0	—	10,5	—	7,8	5,9	0,126
50	22,5	17,0	—	12,8	—	9,6	—	7,2	5,5	0,123
60	20,9	15,9	—	12,1	—	9,2	—	7,0	5,3	0,119
70	19,5	14,9	—	11,5	—	8,7	—	6,6	5,1	0,117
Азот										
10	19,5	13,5	—	9,3	—	6,4	—	4,5	3,1	0,160
20	16,0	11,7	—	8,5	—	6,2	—	4,5	3,3	0,137
30	13,8	10,4	—	7,9	—	6,0	—	4,5	3,4	0,121
40	12,2	9,4	—	7,2	—	5,6	—	4,3	3,3	0,113
50	11,3	8,8	—	6,9	—	5,4	—	4,3	3,3	0,106
60	10,8	8,5	—	6,6	—	5,2	—	4,1	3,2	0,106
70	10,6	8,3	—	6,5	—	5,1	—	3,9	3,1	0,106

Растворимость в воде. Исследование растворимости инертных газов в пресных водах показало, что температурные минимумы растворимости гелия и других газов не совпадают. Для гелия он приуро-

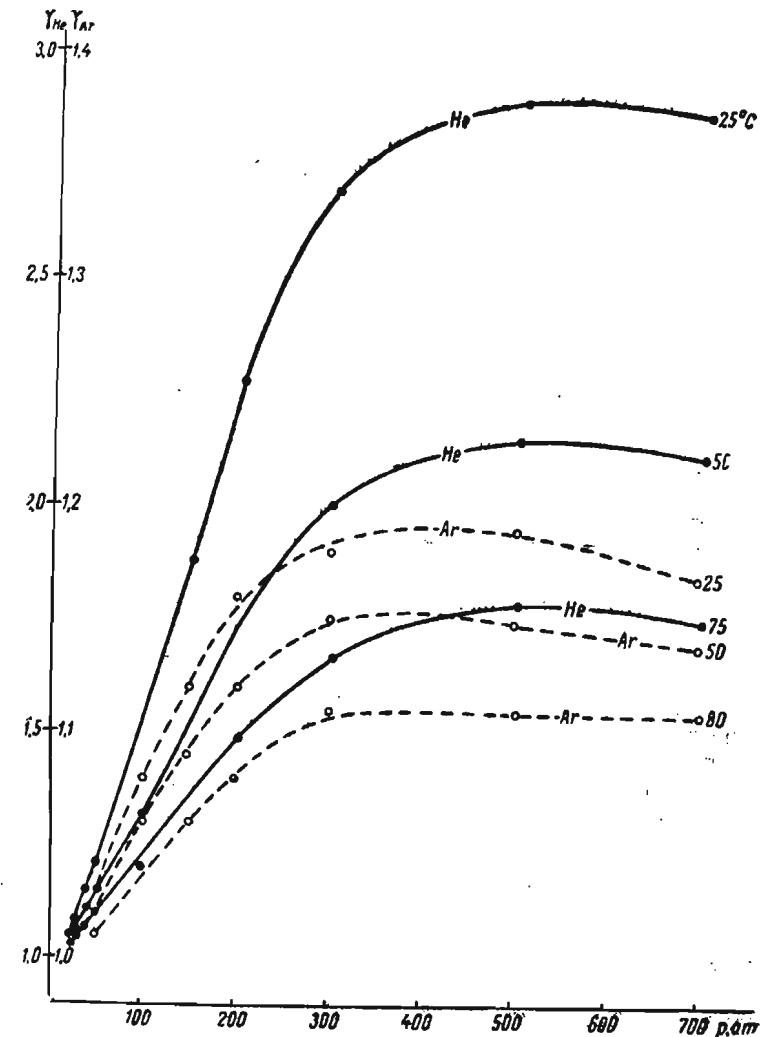


Рис. 1. Изменение коэффициента активности гелия (He → O) и аргона (Ar → O) в смеси с метаном в зависимости от давления [по А. Ю. Нампту и М. М. Бондаревой, 1959].

чен к 25—40° С, для азота к 70—80° С, для метана к 80—90° С [Мишина и др., 1961]. Температурный минимум растворимости аргона приурочен, вероятно, также к 70—100° С. В целом по мере повышения температуры и давления растворимость гелия

Таблица 6  
Растворимость гелия, аргона, азота и метана (см<sup>3</sup>) в 1 г пресной

p, ат	Гелий [Намиот, 1963]				Аргон [Намиот, 1963]			Азот
	0	25	50	75	10	25	50	25
25	0,2322	0,2156	0,2225	0,2442	—	—	—	—
50	0,4674	0,4332	0,4445	0,4892	1,74	1,43	1,10	0,348
100	0,9240	0,8491	0,8827	0,9699	3,46	2,60	2,00	0,674
200	1,807	1,688	1,734	1,907	5,82	4,52	3,56	1,264
300	2,643	2,478	2,552	2,805	7,42	5,97	4,80	2,257
400	3,436	3,241	3,358	3,666	—	7,20	5,90	3,061
500	4,196	3,975	4,114	4,489	—	8,20	6,80	3,74
600	4,916	4,681	4,844	5,277	—	9,10	7,60	4,44
700	—	—	—	—	—	9,90	8,20	5,15
1000	7,421	7,263	7,536	8,251	—	—	—	—

Таблица 7  
Растворимость гелия  $\sigma$  при высоких температурах в 1 г воды при атмосферном давлении [Намиот и др., 1961], см<sup>3</sup>

t, °C	$\sigma$	t, °C	$\sigma$
100	0,012	180	0,025
120	0,014	200	0,031
140	0,017	300	0,076
160	0,021		

увеличивается, с увеличением минерализации вод — уменьшается (табл. 5, 6 и 7).

Растворимость в воде гелия, присутствующего в смеси газов, резко увеличивается по сравнению с растворимостью чистого гелия. Это увеличение становится заметным уже при давлениях свыше 20 ат и концентрации гелия в смеси газов ниже 70%, причем чем меньше его концентрация (He → 0), тем выше растворимость.

Для численного выражения изменения растворимости газа в зависимости от его концентрации пользуются коэффициентом активности [Намиот и др., 1959]. Коэффициент активности  $\gamma$ , какого-либо газового компонента  $i$  отражает изменение растворимости его в смеси с другими газами по сравнению с растворимостью чистого газа. Величина коэффициента активности зависит от природы газа и его процентного содержания в смеси, а также от давления и температуры.

На рис. 1 приведены графики изменения коэффициента активности гелия и аргона в смеси с метаном. По данным А. Ю. Намиота [1959], коэффициент активности, равный, например, 2,0, означает, что растворимость гелия при данных условиях в два раза превышает растворимость чистого гелия. Сведения, приведенные выше, свиде-

воды при различных температурах (°C) и давлениях

[Мишнина и др., 1961]			Метан [Мишнина и др., 1961; Намиот, 1963]					
50	75	100	25	50	75	100	120	160
—	—	—	0,755	0,586	0,468	0,459	0,46	0,65
0,29	0,247	0,2	1,375	1,053	0,910	0,900	0,89	1,24
0,56	0,494	0,533	2,317	1,884	1,633	1,661	1,69	2,39
1,011	0,946	0,986	3,530	2,898	2,620	2,716	2,96	4,10
1,830	1,732	1,822	4,355	3,665	3,568	3,382	3,95	5,42
2,534	2,413	2,546	4,990	4,336	4,037	4,224	4,72	6,70
3,12	2,96	3,789	—	4,835	4,539	4,756	5,30	7,83
3,72	3,58	3,79	—	5,290	4,977	5,248	5,84	8,60
4,43	4,27	4,53	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—

тельствуют о том, что в условиях высоких температур, больших давлений и незначительных концентраций гелия в смеси газов, т. е. в условиях, аналогичных естественной обстановке глубинных недр, гелий ведет себя как хорошо растворимый газ. Расчеты, выполненные А. Х. Махмудовым при систематизации материалов по растворимости гелия в воде, показали, что при температуре 75° С и давлении 500 ат растворимости чистых гелия и метана практически равны. Если же гелий находится в смеси с метаном (He → 0), то при той же температуре 75° С гелий становится уже более растворимым, чем метан при давлении 200 ат.

Растворимость чистого гелия в воде даже при давлении 700 ат меньше растворимости аргона, а когда эти газы находятся в смеси с метаном (He → 0; Ar → 0; CH<sub>4</sub> → 100), то растворимость в воде гелия уже при давлении ≈ 400 ат и при температурах от 25 до 50° С начинает превосходить растворимость аргона.

**Растворимость в нефтях.** Растворимость газа в нефтях зависит от их физико-химических свойств, температуры и давления. В парафиновых углеводородах растворимость инертных газов и азота выше, чем в нафтеновых, а в нафтеновых выше, чем в ароматических.

В табл. 8 приведены данные о растворимости инертных газов в предельных углеводородах. Растворимость их в нефтях изучена значительно слабее, чем в водах и углеводородах.

Экспериментальные исследования растворимости гелия, аргона и азота в нефтях, выполненные А. А. Черепенниковым [1951а], позволили ему сделать выводы, что растворимость инертных газов в нефти уменьшается с увеличением удельного веса нефти и ростом температуры. Наиболее растворимым среди изученных газов является аргон, наименее — гелий. В изученных интервалах температур от 15 до 40° С растворимость инертных газов и азота в нефтях при атмосферном давлении значительно превосходит растворимость их

Растворимость инертных газов в предельных углеводородах ( $\text{см}^3$ , при  $t=0^\circ\text{C}$ ,  $p=760$  мм рт. ст. в 1  $\text{см}^3$  растворителя) при различных температурах и атмосферном давлении [Clevet, 1958]

Газ и его молекулярный вес	Растворитель	Коэффициент абсорбции Бунзена					
		0,0388 при $15^\circ\text{C}$		0,0445 при $25^\circ\text{C}$		0,0555 при $41,8^\circ\text{C}$	
Гелий; 4,003	n-Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$ n-Октан $\text{C}_8\text{H}_{18}$ n-Декан $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	0,0295 » 15	0,0327 » 25	0,0413 » 41,6	0,0295 » 15	0,0327 » 25	0,0413 » 41,6
		0,0230 » 15,2	0,0277 » 25	0,0324 » 41,4	0,0230 » 15,2	0,0277 » 25	0,0324 » 41,4
		0,0564 » 15	0,0657 » 25	0,0717 » 38,7	0,0564 » 15	0,0657 » 25	0,0717 » 38,7
Неон; 20,183	n-Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$ n-Октан $\text{C}_8\text{H}_{18}$ n-Декан $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	0,0446 » 14	0,0498 » 25,2	0,0593 » 39	0,0446 » 14	0,0498 » 25,2	0,0593 » 39
		0,0362 » 15,9	0,0413 » 25	0,0467 » 39	0,0362 » 15,9	0,0413 » 25	0,0467 » 39
		0,441 » 15	0,439 » 25	0,424 » 40,6	0,441 » 15	0,439 » 25	0,424 » 40,6
Аргон; 39,944	n-Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$ n-Октан $\text{C}_8\text{H}_{18}$ n-Декан $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	0,330 » 14	0,341 » 25	0,346 » 40,3	0,330 » 14	0,341 » 25	0,346 » 40,3
		0,239 » 14,1	0,230 » 25	0,226 » 40,35	0,239 » 14,1	0,230 » 25	0,226 » 40,35
		1,283 » 16,45	1,118 » 25,1	1,114 » 40,6	1,283 » 16,45	1,118 » 25,1	1,114 » 40,6
Криптон; 83,70	n-Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$ n-Октан $\text{C}_8\text{H}_{18}$ n-Декан $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	1,032 » 16,2	0,989 » 25,2	0,926 » 40,3	1,032 » 16,2	0,989 » 25,2	0,926 » 40,3
		0,871 » 16,6	0,844 » 25	0,789 » 40,2	0,871 » 16,6	0,844 » 25	0,789 » 40,2
		5,25 » 16	4,45 » 25,3	3,42 » 43,1	5,25 » 16	4,45 » 25,3	3,42 » 43,1
Ксенон; 131,30	n-Гексан $\text{C}_6\text{H}_{14}$ Изооктан n-Додекан	4,35 » 16	3,75 » 25,5	2,92 » 43	4,35 » 16	3,75 » 25,5	2,92 » 43
		3,56 » 16	3,08 » 25	2,46 » 43	3,56 » 16	3,08 » 25	2,46 » 43
		—	—	—	—	—	—

в пресной воде. Сведения о растворимости гелия, аргона и азота в нефтях, по данным А. А. Черепенникова, приведены в табл. 9.

Таблица 9

Растворимость гелия, аргона и азота ( $\text{см}^3$ , при  $0^\circ\text{C}$  и  $p=760$  мм рт. ст. в 1  $\text{см}^3$  нефти) в нефтях при атмосферном давлении и различных температурах ( $t$ ,  $^\circ\text{C}$ ), по данным А. А. Черепенникова [1951а]

Наименование образца	Удельный вес	Коэффициент абсорбции Бунзена					
		Гелий		Азот		Аргон	
		15—17	40	15—17	40	15—17	40
Нефть из Шорсу	0,900	0,057	0,044	0,106	0,097	0,189	0,178
То же, Бугурусланского р-на	0,884	0,049	0,035	0,114	0,102	0,204	0,184
То же, тр. «Хадыжиннефть»	0,875	0,057	0,040	0,101	0,098	0,195	0,181
То же, Кала, Бакинского р-на	0,867	0,050	0,035	0,108	0,102	0,216	0,189
То же, Бугурусланского р-на	0,863	0,071	0,052	0,130	0,118	0,232	0,213
То же, Краснокамского р-на	0,849	0,071	0,054	0,127	0,118	0,236	0,216
То же, тр. «Хадыжиннефть»	0,835	0,066	0,056	0,135	0,129	0,242	0,221
Керосин	0,828	—	—	0,131	0,112	0,248	0,205
Нефть («белая»), Сураханы, Баку	0,790	0,077	0,054	0,167	0,152	0,304	0,275
Бензин	0,729	0,087	0,066	0,229	0,202	0,411	0,363

Растворимость в твердых телах. Сведения о растворимости гелия в твердых телах крайне ограничены. Отдельные данные о его растворимости в кремнеземе и расплавах пород мы находим у Бэррера

Таблица 10

Растворимость водорода и гелия в кремнеземе и стекле [Бэррер, 1948]

Система	$t$ , $^\circ\text{C}$	Растворимость, $\text{мл}/\text{см}^3$	
		по Вюстнеру	по Вильямсу и Фергюсону
$\text{H}_2$ — $\text{SiO}_2$	1000	0,0103	—
	900	0,0102	—
	800	0,0109	—
	700	0,0099	—
	600	0,0082	—
	400	0,0057	0,0095
$\text{He}$ — $\text{SiO}_2$	300	0,0055	0,0099
	500	—	0,0101
He—стекло пирекс	450	—	0,0103
	500	—	0,0084

Примечание. Данные по Вильямсу и Фергюсону экстраполированы.

и Э. К. Герлинга (табл. 10, 11). Значительно более многочисленны данные о растворимостях гелия в различных технических материалах. В металлах гелий практически нерастворим.

Таблица 11

Растворимость гелия в расплавах, по Э. К. Герлингу [1940]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Давление гелия	Растворимость гелия, $\text{мл}^3/\text{г}$
Габбро-диабаз . . . . .	1300	513	1,77
То же . . . . .	1300	716	2,68
Хлористый калий . . . . .	900	698	1,13
Габбро-диабаз (расплав выдерживался при $900^\circ\text{C}$ в течение 24 ч) . . . . .	900	646	1,93

### Диффузия гелия

Диффузия — это процесс проникновения какого-либо вещества в среду другого, обусловленный хаотическим тепловым движением атомов и молекул. Коэффициент диффузии  $D$  численно равен количеству диффундирующего вещества, проникающего в единицу времени через единицу поверхности при условии, что разность концентраций на двух поверхностях, отстоящих друг от друга на единицу длины, равна единице. Его размерность —  $\text{см}^2/\text{сек}$ . Коэффициенты диффузии обратно пропорциональны плотности газа. Причиной возникновения диффузии может служить не только наличие градиента концентраций, но также и различие в температурах в различных частях смеси (термодиффузия).

Диффузия может происходить в однокомпонентной среде (самодиффузия), в двухкомпонентной (взаимодиффузия) и в многокомпонентной смеси. Некоторые опытные данные о коэффициентах диффузии гелия в газовой среде приведены в табл. 12.

Таблица 12

Коэффициент диффузии  $D$  в газовых средах,  $\text{см}^2/\text{сек}$  [Фастовский и др., 1964]

Коэффициент самодиффузии He — He		Коэффициент взаимодиффузии He — Ar	
$T, ^\circ\text{K}$	$D_{1-1}$	$T, ^\circ\text{K}$	$D_{1-2}$
14,4	0,0124	273,0	0,640
64,8	0,147	318,0	0,825
192,0	0,843	354,0	0,979
296,0	1,68	418,0	1,398

Коэффициент диффузии гелия значительно выше, чем для любых других газов. При температуре  $25^\circ\text{C}$  и давлении  $1 \text{ ат}$  коэффициенты самодиффузии различных газов составляют,  $\text{см}^2/\text{сек}$  [Фастовский и др., 1964]: He — 1,7; Ne — 0,5; Ar — 0,2;  $\text{H}_2$  — 1,3;  $\text{N}_2$  — 0,2;  $\text{CO}_2$  — 0,1.

Коэффициенты взаимодиффузии газов ( $\text{см}^2/\text{сек}$ ) при  $p = 1 \text{ ат}$  и  $0^\circ\text{C}$  составляют [Презент, 1949; Путилов, 1959]: He —  $\text{N}_2$  — 0,70;  $\text{H}_2$  —  $\text{N}_2$  — 0,67;  $\text{O}_2$  —  $\text{N}_2$  — 0,18.

Изучение характера разделения смесей газов в сосудах с поддерживаемым градиентом температур показало, что интенсивность разделения смеси  $\text{N}_2$  — He значительно выше, чем для смеси, например,  $\text{N}_2$  —  $\text{CO}_2$  (при равном содержании компонентов). Термодиффузионная постоянная ( $\alpha$ ) при температурах  $288$ — $373^\circ\text{K}$  составляет для первой смеси — 0,36, а для второй — 0,06. Отношение термодиффузионных постоянных  $R_T$  составляет соответственно 0,64 и 0,26 [Грю и др., 1956].

Явления термодиффузии используются в технике для разделения изотопов и газовых смесей. Ее следует учитывать при решении вопросов диффузии в глубинных недрах Земли, где постоянно существует температурный градиент.

Для жидкостей коэффициент диффузии в сотни тысяч раз меньше, чем для газов; порядок величины  $D$  для газов, в том числе и гелия, в воде около  $10^{-5}$ . В табл. 13 приведены некоторые данные о коэффициентах диффузии различных газов в воздухе и в воде.

Таблица 13

Коэффициент диффузии  $D$  газов в воздухе и в воде при нормальных условиях [Путилов, 1959; Соколов, 1956]

Газ	$D$ (в воздухе), $\text{см}^2/\text{сек}$	$D$ (в воде), $10^5 \text{ см}^2/\text{сек}$
Метан . . . . .	0,23	2,2
Этан . . . . .	0,18	1,6
Пропан . . . . .	0,14	1,3
Углекислый газ . . . . .	0,14	1,6
Кислород . . . . .	0,17	1,9
Азот . . . . .	—	1,8
Водород . . . . .	0,61	4,6
Гелий . . . . .	$\approx 0,65$	$\approx 3$

Коэффициент диффузии в твердых телах значительно меньше, чем в жидкостях.

Характер диффузии гелия и его смесей через жидкости и твердые тела, особенно через природные объекты, изучен слабо. Имеющиеся данные о величинах коэффициентов диффузии внутри кварца и стекла приведены в табл. 14.

Таблица 14  
Коэффициенты диффузии  $D$  гелия и водорода в кварце  
и стекле,  $\text{см}^2/\text{сек}$  [Баррер, 1948]

Газ	Твердое тело	$t$ , °C	$D$
Гелий	Кварц	20	$(0,024-0,055) \cdot 10^{-8}$
		500	$(0,17-0,14) \cdot 10^{-6}$
	Стекло	200	$0,0045 \cdot 10^{-8}$
		500	$0,02 \cdot 10^{-6}$
		200	$(0,05-0,08) \cdot 10^{-8}$
Водород	Кварц	500	$(0,006-0,011) \cdot 10^{-6}$

Исследования диффузии в минералах показало, что движение атомов происходит как по дефектам кристаллической структуры, так и объемным путем, сквозь кристаллическую решетку.

Данные, приведенные Ранкама [1963] по материалам различных исследователей, свидетельствуют о крайне низкой величине коэффициента диффузии гелия в минералах соли. Так, в сильвине при  $t = 40^\circ \text{C}$   $D_{\text{He}} = 2,0 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{сек}$ . Значения коэффициентов диффузии для чистого NaCl и смеси KCl (45%) и NaCl (55%) при 80 и  $40^\circ \text{C}$  составили соответственно  $4,0 \cdot 10^{-17}$  и  $3,2 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2/\text{сек}$ . Несколько противоречат этим данным сведения о коэффициенте диффузии в окрашенном галите при температуре  $25^\circ \text{C} - 3,0 \times 10^{-15} \text{ см}^2/\text{сек}$ . Следует отметить попутно, что величина диффузии аргона в минералах соли еще ниже, чем гелия.

Мы не располагаем данными о коэффициентах диффузии гелия или смеси газов с гелием через различные типы горных пород, однако на основе данных о коэффициентах диффузии метана через породы, для которого  $D \approx 10^{-6} \text{ см}^2/\text{сек}$ , и приведенных выше сведений можно предположить, что значения  $D$  для гелия в породах составляют примерно  $10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$  и меняются в зависимости от состава пород, их коллекторских свойств, плотности и т. п.

Ньютон и Роунд [1961] рекомендуют принимать коэффициенты диффузии гелия для твердого вещества (силикатной породы) и воды равными соответственно  $10^{-10}$  и  $10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$ . Сквозь металлы гелий практически не диффундирует даже при высоких температурах в связи с его нерастворимостью в них.

Опытами Гана [Зайт, 1958] было установлено, что если при распаде радиоактивного вещества возникает газообразный продукт, то он быстро диффундирует к поверхности. По-видимому, диффузия в таких случаях происходит под влиянием радиационных эффектов, которые являются результатом взаимодействия различных ядерных излучений с твердыми телами (см. гл. IV).

В настоящее время общепризнано, что диффузия в твердых телах происходит посредством миграции дефектов в кристалле; этими дефектами в металлах являются главным образом вакансии, а в ионных солях — вакансии или внедренные атомы. Гелий может диффун-

дировать также и сквозь межкристаллические пространства решеток минералов.

Поскольку облучение быстрыми частицами приводит к образованию таких дефектов, естественно ожидать, что между диффузией и дозой облучения существует тесная зависимость. Вследствие облучения в кристалле может образоваться неравномерное число дефектов и, следовательно, скорость диффузии может увеличиваться в той области температур, в которой при обычных условиях эта скорость мала.

Основные качественные выводы, сделанные Динсом и Винайрдом [1960] о влиянии эффекта радиации на величину коэффициента диффузии  $D$ , состоят в следующем.

1. При высоких температурах в связи с отжигом большей части дополнительных дефектов, создаваемых радиацией, облучение оказывает очень незначительное влияние на величину  $D$  (отжиг — исчезновение дефектов в результате их перемещения под влиянием высоких температур).

2. При низких температурах коэффициенты диффузии могут значительно увеличиться ( $30-50^\circ \text{K}$ ).

В промежуточной области температур  $D$  будет увеличиваться. Это явление изменения диффузионных свойств пород под влиянием длительного воздействия на них включенных радиоэлементов следует учитывать при решении вопросов о миграции гелия.

#### Проницаемость твердых и жидких тел для гелия и других газов

Явление проникновения газа сквозь твердое или жидкое тело — это сложный процесс, который может быть разделен на несколько этапов: сорбцию газа на поверхности тела, растворение в нем газа, диффузию и испарение на противоположной поверхности тела. Все названные процессы идут в направлении уменьшения градиента концентраций. Скорость проникновения газа определяется скоростью самого медленного из процессов — диффузии, а ее возможность — растворимостью. Именно нерастворимостью гелия в металлах и объясняется их практическая непроницаемость для гелия.

Величина проницаемости, характеризуемая обычно коэффициентом проницаемости, зависит от природы газа и вещества, через которое он проходит, а также от температуры.

Коэффициент проницаемости  $K$  может быть выражен как произведение коэффициентов диффузии  $D$  и растворимости  $S$  [Соколов, 1936, 1947; Баррер, 1948]. Эти коэффициенты изменяются экспоненциально с температурой.

Выполненные Рэлеем [Баррер, 1948] исследования диффузии гелия сквозь монокристаллы ионного типа показали, что величина их проницаемости оказалась ниже пределов чувствительности использованного им прибора (табл. 15).

Таблица 15

Проницаемость ионных кристаллов для гелия, по Рэлею [Бэррер, 1948]

Вещество	Проницаемость, $\text{мл} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (при толщине 1 мм и давлении 1 ат)
Кварц (вырезанный перпендикулярно к оптической оси)	$< 0,05 \cdot 10^{-8}$
Слюда (слоистая пластина)	$< 0,06 \cdot 10^{-9}$
Кальцит (слоистая пластина)	$< 0,05 \cdot 10^{-8}$
Каменная соль	$< 0,2 \cdot 10^{-6}$
Селенит (слоистая пластина)	$< 0,7 \cdot 10^{-9}$
Берилл (вырезанный перпендикулярно к оптической оси)	$< 0,1 \cdot 10^{-8}$
Берилл (вырезанный параллельно оптической осн)	$< 0,15 \cdot 10^{-7}$

Исследование влияния температуры на скорость проникновения инертных газов через кварц, выполненное Бэррером [1948], установило, что проницаемость кварца для тяжелых газов ( $\text{Ar}$ ,  $\text{N}_2$  и воздух) увеличивается по мере нагревания, тогда как для водорода и гелия влияние нагревания на проницаемость было менее существенным (табл. 16).

Таблица 16  
Проницаемость  $P$  кремнезема для гелия, по Бартону, Братену, Бэрреру, Хогнесу и Вильгельму [Бэррер, 1948]

$t, ^\circ\text{C}$	$P, 10^{-9}$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, 10^{-9}$
-200	0,003	150	0,78
-140	0,004	200	1,39
-100	0,007	400	6,15
-50	0,015	600	16,4
0	0,050	800	28,4
20	0,104	1000	45,4
90	0,274		

Примечание. Проницаемость  $P$  в табл. 16, 17, 18, 19 дана в объемах, выраженных в миллилитрах для газа, диффундирующего в 1 сек через 1  $\text{см}^2$  стенки барьера толщиной 0,1 см, когда поперек стенки поддерживается разность давлений, равная 1 ат.

Было установлено также, что слабые основания и амфотерные окислы —  $\text{PbO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — влияют на проницаемость незначительно.

Числовые значения проницаемостей, по Бэрреру, в кремнеземе и различных стеклах приведены в табл. 17, 18, 19.

Таблица 17

Проницаемость различных сортов стекла для гелия [Бэррер, 1948]

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$P, 10^{-9}$
Кремнезем	300	3,15
Пирекс (кварцевое стекло)	300	0,38
Натриевое стекло	283	0,0098
Свинцовое стекло	283	0,0037
Иенское стекло	300	0,0036
Тюрингенское стекло	300	0,00084

Таблица 18

Избирательная проницаемость  $\text{SiO}_2$  для различных газов при  $t = 900^\circ\text{C}$  [Бэррер, 1948]

Газ	$P, 13^{-9}$
He	36,2
H <sub>2</sub>	6,4
Ne	1,18
N <sub>2</sub>	0,95
Ar	0,58

Таблица 19

Проницаемость стекол по отношению к гелию при комнатной температуре [Бэррер, 1948]

Вещество	$P, 10^{-9}$	Вещество	$P, 10^{-9}$
Кремнезем	0,058	Плавленый $\text{B}_2\text{O}_3$	0,055
Оптический кварц	0,043	Белое листовое стекло «экстра»	$< 0,025 \cdot 10^{-4}$
Тонкая кварцевая трубка	0,053	Микроскопное покровное стекло	$< 0,020 \cdot 10^{-4}$
Стекло пирекс	0,004	Натриевое стекло	$0,043 \cdot 10^{-7}$

Табл. 17 иллюстрирует характер изменения проницаемости кремнезема и ряда стекол для гелия в зависимости от их химического состава.

В табл. 18 приведены сведения, характеризующие селективность проницаемости кремнезема по отношению к различным газам. В ряде случаев представляют интерес сведения о проницаемости стекол для гелия при комнатной температуре, приведенные в табл. 19. Проницаемость каучуковой пластины толщиной 1 мм для гелия составляет  $12 \cdot 10^{-9}$  [Бэррер, 1948].

В связи с высокой проницаемостью резиновых баллонов для отбора проб газа использовать их для анализа на гелий нельзя. В течение дня через 1  $\text{см}^2$  резинового листа толщиной 1 мм просачивается при обычном давлении 3,5  $\text{см}^3$  гелия.

## § 2. МЕТОДЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ

Определение содержания инертных компонентов в газовых смесях, в том числе и гелия, в лабораторных условиях выполняется с помощью приборов, основанных на физико-химических и физических методах анализа.

**Физико-химические методы.** Определение инертных элементов остаточной смеси с разделением их на группу легких ( $\text{He} + \text{Ne}$ ) и тяжелых ( $\text{Ar} + \text{Kr} + \text{Xe}$ ) производится либо объемным методом с использованием низких температур, либо каких-нибудь их физических свойств, резко отличающих компоненты бинарной смеси друг от друга.

Наиболее широкое распространение получил объемный метод определения гелия и аргона. Инертные газы освобождаются от всех сопутствующих химически активных газов путем их поглощения различными реагентами. Легкие инертные газы —  $\text{He} + \text{Ne}$  — отделяются от группы тяжелых —  $\text{Ar} + \text{Kr} + \text{Xe}$  — путем адсорбции последних на активированном угле, охлажденном жидким азотом или кислородом. Количественное измерение содержания гелия с примесью неона и аргона с примесью криптона и ксенона производится с помощью ртутного манометра Мак-Леода.

Примесь неона в гелии, а также криптона и ксенона в аргоне обычно очень невелика. Поэтому легкую фракцию инертных газов принимают практически за гелий, а тяжелую — за аргон.

Для воздушных газов, а также для подземных газов с низким содержанием гелия в их составе (менее 0,005% по объему) необходимо учитывать, что содержание неона в легкой фракции инертных газов воздуха достаточно велико (около 0,0018%) и должно учитываться при определении содержания гелия.

Объемный метод определения инертных газов при низких температурах впервые был использован Дьюаром еще в 1904 г., а затем Кэди и Мак-Фарландом (1907 г.), Муре (1913 г.) и другими исследователями. Применяемые ими приборы, вначале очень сложные по устройству, впоследствии значительно упростились и усовершенствовались, повысилась точность выполнения анализов.

В СССР большое распространение получили приборы конструкции В. А. Соколова [1933, 1950], В. Г. Хлопина и Э. К. Герлинга [1932], А. А. Черепенникова [1931, 1935, 19516] и др. Для всех них характерны хорошие результаты анализов, некоторые модификации приборов дают возможность выполнять анализы быстро, но ориентировочно, другие — весьма точно, прецизионно. Детально с классическим методом анализа и схемой прибора для определения инертных компонентов в естественных газовых смесях можно познакомиться в «Руководстве по опробованию и анализу природных газов», составленном А. А. Черепенниковым [19516], и других работах.

Основные недостатки метода — его трудоемкость в связи с необходимостью тщательной предварительной очистки газа и невозможность прямого определения гелия и аргона.

В. А. Соколов [1936] предложил вместо глубокого охлаждения остаточной газовой смеси определять ее состав по удельному весу. Смесь при этом принимается за бинарную, а содержание гелия и аргона определяется по составленной им номограмме. В. А. Соколов [1936] и Э. К. Герлинг [1953] рекомендовали определять содержание гелия и аргона по теплопроводности, используя значительную разницу в их свойствах проводить тепло: теплопроводность гелия почти в девять раз выше теплопроводности аргона. Еще в 1919—1920 гг. Харбер и Эдвардс предложили применять для этих целей рефрактометрический метод на основе более высокого коэффициента преломления аргона по сравнению с гелием. Предлагалось использовать и многие другие физические параметры для определения количеств гелия и аргона в составе остаточной бинарной смеси, в частности акустический, диффузионный и другие; все названные методы не имеют таких преимуществ как объемный метод, а в ряде случаев отличаются большей сложностью и меньшей точностью.

Подавляющая часть определений содержания гелия и аргона в составе природных газовых смесей в СССР и США выполнена объемным методом с помощью различных модификаций стеклянных высоковакуумных приборов типа установок Хлопина, Соколова, Герлинга и др.

**Масс-спектрометрический метод.** К настоящему времени в СССР намечались два направления разработки методов масс-спектрометрического определения инертных компонентов в составе газов: одно из них основано на усовершенствовании и доработке гелиевых течеискателей типа ПТИ-6 и других с целью приспособления их для выполнения массовых количественных определений гелия в составе газов, другое — на модернизации стандартной масс-спектрометрической аппаратуры с той же целью.

Гелиевые течеискатели — это портативные приборы, обладающие высокой чувствительностью, пригодные после небольших изменений для ориентировочного определения малых количеств гелия. При более высоких концентрациях гелия в составе анализируемых проб погрешность анализа увеличивается. Усовершенствование отдельных узлов и деталей прибора, выполненное в ряде лабораторий, позволило повысить надежность количественных определений содержания гелия в составе газов. Значительное внимание совершенствованию этого типа анализа уделено В. С. Глебовской, Н. И. Мусиченко [1964] и др. Достоинства приборов — их портативность, возможность выполнения экспрессных анализов проб газа на содержание в них гелия даже в полевых условиях, недостатки — невысокая точность определений при повышенных концентрациях гелия в составе газов и невозможность одновременного определения аргона.

Разработкой приспособления стандартной масс-спектрометрической аппаратуры для количественных исследований инертных



газов в составе газов занимались многие исследователи, но особенно детально — В. З. Митрофанов [1964, 1966]. Разработанная им схема модернизации масс-спектрометра МИ-1305 и методика определения изотопов  $Ne^4$  и  $Ar^{40}$  позволяют выполнять количественные замеры с необходимой точностью, чувствительностью, экспрессностью и воспроизводимостью результатов. Основное достоинство разработанной В. З. Митрофановым методики определений — возможность выполнения анализа без предварительной очистки от углеводородных газов, обогащенных тяжелыми фракциями, не только для гелия, но и для аргона. При обычной методике трудности определения обусловлены наложениями спектра осколочных ионов углеводородных молекул на спектр основного изотопа аргона.

И. А. Деменков [1963], работая в том же направлении, использовал для определений гелия в составе газов молекулярный масс-спектрометр — МХ-1302.

При совершенно очевидных достоинствах метода существенными его недостатками являются сложность устройства и обслуживания аппаратуры, ее громоздкость, необходимость обеспечения высококвалифицированными кадрами и др.

Оба разрабатываемые в настоящее время направления масс-спектрометрического анализа редких газов (приспособление стандартных масс-спектрометров и модернизация их простейших типов — гелиевых течеискателей) перспективны и заслуживают всемерного развития, хотя и с различными целями: первые — для точных аналитических определений содержания гелия и аргона в составе газов, вторые — для массовых ориентировочных определений количества гелия в газах в полевых условиях.

**Спектральные методы.** Для определения содержания инертных газов в составе газовых смесей спектральные методы неприменимы в связи со сложностью состава естественных газовых смесей, исключаяющей возможность расшифровки их спектров по компонентам, но для определения примесей в составе инертных газов они вполне приемлемы. В числе примесей, поддающихся количественному определению, находятся азот и водород. При загрязненности инертного газа углеводородами свыше 0,01% интенсивность углеводородных полос в составе спектра столь велика, что трудно выделить спектр инертных газов. Спектральные методы наиболее пригодны для определения состава бинарных смесей.

Используя различные сочетания источников возбуждения спектра и условий разряда, можно довести точность определения содержания примесей в инертных газах до тысячных долей процента. Панет и Гюнтер [1952] регистрировали до 0,002% неона в гелии с помощью высокочастотного безэлектронного разряда. Диффендак и Вольф [Duffendack, Wolf, 1939] при использовании тлеющего разряда определяли примеси водорода и азота в гелии с точностью до 0,005% для водорода и 0,25% для азота.

С помощью высокочастотного разряда, используя монохроматические фильтры, О. П. Бочкова и Е. Я. Шрейдер [1963] выпол-

няли количественный анализ смеси неона и гелия в интервале концентраций неона от 0,001 до 99,9%. Содержание аргона в гелии определялось ими в интервале концентраций 0,005—0,1 и 1,5—10% с помощью высокочастотного разряда в капиллярах различного размера при разных давлениях.

Спектральный метод может применяться для определения компонентного состава смеси инертных газов, полученной при их очистке физико-химическим методом с применением низких температур. Таким путем может быть определено содержание неона в гелии, криптона в аргоне и т. д.

При определении количеств инертных газов в составе их смесей применяются обычно исследования спектров испускания — эмиссионный спектральный анализ. Исследования по спектрам поглощения (молекулярный спектральный анализ) практически не используются в связи с техническими трудностями измерения длин волн резонансных линий гелия, неона и аргона в далекой (вакуумной) части ультрафиолетовой области спектра.

Метод анализа инертных газов в видимой области спектра с использованием абсорбции в возбужденном газе был разработан О. П. Бочковой [1963]. Ею определялось содержание примесей азота в аргоне, неоне и гелии в пределах от 0,1 до 2,0%.

**Хроматографические методы.** Перспективным методом анализа является хроматографический. Простота и легкость массовых анализов сложных по составу углеводородных газовых смесей при достаточно высокой точности получаемых результатов привлекают все больше внимания аналитиков к этому виду исследований. Разработаны и продолжают совершенствоваться и хроматографические методы определения инертных газов.

Сущность хроматографического метода газового анализа состоит в разделении компонентов газовой смеси при ее фильтрации сквозь слой адсорбента, имеющего большую поверхность. Развитию хроматографических методов анализа инертных газов особенно способствовало использование в качестве адсорбентов («молекулярных сит») пористых кристаллических веществ, обладающих свойством избирательного поглощения молекул определенного для данного типа сит размера.

Мы остановимся лишь на отдельных работах, выполненных различными исследователями в этой области. Применяя активированный уголь или силикагель в качестве адсорбента, а водород или углекислоту в качестве газа-носителя, Рэй, Вилкинс и Вильсон, Томас и Альба и другие исследователи достаточно успешно разделяли смеси инертных газов или определяли в них примеси других газов. Используя молекулярные сита 5А, Гнаук и Френцель [Gnauck, Frenzel, 1959] последовательно разделили гелий, неон, аргон, криптон, ксенон, водород, кислород и метан методом чисто адсорбционной хроматографии. Чувствительность метода авторами не указана.

Безводородные газовые смеси, содержащие не более 25% азота, успешно разделялись Графом и Тотом [1963] методом элюентной

хроматографии. Янак и Тесаржик [Janak, Tesarik, 1955] определяли до 0,001% гелия в природных газовых смесях с помощью хроматографического разделения сконцентрированных в небольшом объеме гелия, неона и водорода. Определение гелия с точностью до 0,01% производилось С. Е. Бараненко и Н. М. Бурных [1962] на лабораторном хроматографе ХЛГ. При высоких концентрациях гелия (свыше 1%) его содержание может устанавливаться и на хроматографах ХТ-2М, но в природных газовых смесях такие концентрации гелия встречаются одишком редко. Двухступенчатый хроматографический метод определения гелия и аргона в природных газах разработан А. Я. Литовченко [1963]. На сконструированном им приборе определялись 0,01% аргона и 0,002% гелия с относительной точностью  $\pm 3\%$ .

### Глава III

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ГЕЛИЯ И ЕГО ПРИРОДНЫЕ ИЗОТОПЫ

Гелий широко распространен в природе, но встречается он только в смеси с другими газами. Скоплений чистого гелия в природных условиях не выявлено. Гелий имеется в атмосфере и природных газах недр, он присутствует в кристаллических решетках минералов, в газах, заполняющих поры осадочных и изверженных пород. Он растворен в подземных и поверхностных водах. На Земле гелий повсеместен, но высоких концентраций достигает редко. Еще шире распространен гелий во Вселенной. Многочисленные спектральные анализы излучений Солнца и звезд показали, что гелий присутствует на них в значительно ббльших количествах, чем на Земле.

Сведения об относительной распространенности инертных газов и в том числе гелия во Вселенной и в земной коре приведены в табл. 20.

Таблица 20

Распространенность инертных газов по данным Зюсса, Юри и Камерона [Cook, 1961]

Элемент	В земной коре, включая океан и атмосферу, в атомах на $10^4$ атомов кремния	Во Вселенной, в атомах элемента на $10^4$ атомов кремния	Отношение
He	$2,16 \cdot 10^{-3}$	$3,08 \cdot 10^7$	$7,0 \cdot 10^{-11}$
Ne	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^{-9}$
Ar <sup>40</sup>	$9,42 \cdot 10^{-3}$	$\approx 0$	—
Ar <sup>36+38</sup>	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^8$	$2,52 \cdot 10^{-7}$
Kr	$2,45 \cdot 10^{-6}$	0,513	$4,8 \cdot 10^{-6}$
Xe	$2,39 \cdot 10^{-7}$	0,040	$6,0 \cdot 10^{-6}$
Si	$1,00 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^4$	1,00

### § 1. РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ГЕЛИЯ

Гелий в космосе. Различные методы исследований Вселенной — спектральные, оптические, радиоастрономия и другие — показали, что во Вселенной резко преобладают легчайшие газы — водород и гелий, на долю которых приходится соответственно 76 и 23% по весу, все остальные элементы составляют около 1% общей массы в звездах, планетарных туманностях и межзвездном газе.

Из водорода и гелия с примесью других элементов состоит Солнце. В некоторых звездах гелия больше, чем на Солнце. Присутствие гелия обнаружено в атмосферах планет и в метеоритах.

Исследование состава первичных космических лучей, непрерывно падающих из мирового пространства на Землю, показало, что они состоят в основном из протонов и альфа-частиц весьма высокой энергии. Если за единицу принять число ядер атомов водорода (протонов), то количество гелия в их составе 0,15.

**Гелий в атмосфере и гидросфере.** Содержание гелия в атмосферном воздухе крайне невелико — всего 0,000524 об. %, т. е. на каждые 1000 м<sup>3</sup> воздуха приходится всего 5,24 л гелия.

В табл. 21 приведены данные, подтверждающие постоянство содержания гелия в воздухе.

Таблица 21  
Среднее содержание гелия (%) в воздухе различных районов Земли (Юнге, 1958)

Северное полушарие	He, 10 <sup>-4</sup>	Южное полушарие	He, 10 <sup>-4</sup>
Лондон . . . . .	5,240	Мариенталь (Африка) . .	5,233
Новая Земля . . . . .	5,250	То же . . . . .	5,253
Красноярск . . . . .	5,245	Антарктика . . . . .	5,227
Калифорния . . . . .	5,238	То же . . . . .	5,231
Ороно (США) . . . . .	5,239	Рио-де-Жанейро . . . . .	5,250
Панамский канал . . . . .	5,240	Паданг (Суматра) . . . . .	5,232
Карибское море . . . . .	5,243	Веллингтон (Новая Зеландия) . . . . .	5,250
Атлантический океан . . . . .	5,233		
Среднее . . . . .	5,240	Среднее . . . . .	5,239

Наблюдения за спектрами полярных сияний показали, что состав воздуха мало изменяется с высотой, хотя плотность его, естественно, постепенно падает.

В спектрах всех сияний, включая и те, которые простираются до высот 150—250 км, преобладают линии азота и кислорода, а линии легких газов — водорода и гелия — проявляются чрезвычайно слабо. Характерно присутствие спектра линий натрия, происхождение которого большинство исследователей считают космическим [Койпер и др., 1951]. Исследования состава высоких слоев атмосферы, выполненные при помощи радиочастотного масс-спектрометра, поднимаемого на ракетах, показали, что на высотах около 200 км концентрация легких газов (атомарный азот, водород, гелий) не превышает 100 частиц в 1 см<sup>3</sup> [Миртов, 1961]. Видимо, лишь в самых верхих газовой оболочки Земли, за пределами ионосферы, на высотах свыше 1000 км имеет место относительное обогащение газов водородом и гелием.

Исследования ионосферы, выполненные с помощью искусственных спутников Земли, показали, что относительная концентрация водорода и гелия остается незаметной даже на высоте 500—700 км. В настоящее время наиболее обоснованной считается гипотеза атомарно-кислородной атмосферы с небольшой примесью атомов азота, простирающейся, по крайней мере, до высоты 1000 км. В низах экзосферы, на высоте около 1500 км, гелий становится важной составляющей частью. С высот от 2—3 тыс. до 20—30 тыс. км простирается очень протяженная и очень разреженная (1000 частиц на 1 см<sup>3</sup>) ионосфера, состоящая из водородных атомов (протонов) и атомов гелия, переходящая постепенно в межпланетный газ. Концентрация последнего оценивается величиной порядка нескольких частиц на 1 см<sup>3</sup>.

На поверхностных водах гелий содержится в значительных объемах в составе растворенных газов.

По данным Ранкама и Сахама [Rankama, Sahama, 1950] состав газов, растворенных в морской воде, следующий (мл/л): O<sub>2</sub> — 0,85 и более; N<sub>2</sub> — 8,4—14,5; CO<sub>2</sub> — 35—56; Ar — 0,2—0,4; He + Ne — (1,2 ÷ 1,8) · 10<sup>-4</sup>.

Исследование газового состава многих образцов морской воды, отобранных ниже ее уреза, до глубин 3000 м, показало, что воды океана равномерно насыщены гелием и неоном на всех глубинах, причем средняя концентрация He + Ne составляет около (1,6 ÷ 1,7) · 10<sup>-4</sup> см<sup>3</sup>/л [Rakestraw и др., 1939].

Приводя эти сведения о равномерности гелиенасыщения вод океана, необходимо обратить внимание, что эту характеристику не следует рассматривать как нечто абсолютное, так как с увеличением глубины увеличивается растворимость гелия и, по-видимому, его концентрация в составе растворенных газов. Например, на дне глубоководных впадин, где давление достигает 800—1000 ат, растворимость гелия увеличивается примерно в 20 раз.

**Гелий в земной коре.** По степени распространенности гелий занимает далеко не последнее место среди других химических элементов Земли. Если распределить все химические элементы земной коры по тринадцати декадам В. И. Вернадского, то гелий попадает в восьмую из них вместе с такими элементами, как платина, золото, иридий, теллур и др.

Кларк гелия в земной коре, по Ферсману [Сауков, 1966], составляет 10<sup>-6</sup> вес. %, по Ранкама — 3 · 10<sup>-7</sup>% [1963].

Распространенность гелия в земной коре значительно ниже, чем в целом во Вселенной. Это явление дефицита гелия на Земле обычно объясняется потерей гелия, как и других наиболее летучих компонентов, при формировании планеты. Наиболее изученными объектами земной коры, с точки зрения содержания гелия, являются газы минералов (пород, руд), а также природные газы, присутствующие в земных недрах как в свободном состоянии, так и растворенные в подземных флюидах.

Самые высокие концентрации гелия, до 10,5 см<sup>3</sup>/г, обнаружены, по данным Мезона [Mason, 1958], в ториианите. Индийские монациты

выделяют гелия около 0,75—1,00 см<sup>3</sup>/г. В клевете и фергусоните содержание гелия составляет часто 0,8—3,5 см<sup>3</sup>/г. В изверженных породах количество его редко достигает 10<sup>-4</sup> см<sup>3</sup>/г, но один из образцов берилла содержал гелия 0,1 см<sup>3</sup>/г.

Характерно и другое явление — избыточное содержание гелия в некоторых нерадиоактивных минералах, отмеченное впервые в 1938 г. (Фей, Глюккауф и Панет).

Литиевые, бериллиевые и борные минералы часто содержат гелия значительно больше, чем урана и тория, присутствующих в их структуре (табл. 22). Объяснение этому явлению было дано впервые Э. К. Герлингом [1940], который экспериментально продемонстрировал, что в расплавленных породах и, в частности, в габбро-диабазе растворяется достаточно заметное количество гелия (см. табл. 14). Селективная абсорбция гелия в литиевых, бериллиевых и борных минералах создает благоприятные условия для накопления гелия в этих минералах за счет других. Следовательно, «избыточного» гелия в них, по существу, нет, скорее это лишь гелий, «избыточно захваченный» из расплава пород при их кристаллизации.

Таблица 22

Избыток гелия в бериллиевых и борных минералах [Хлопин и др., 1941]

Минерал (местонахождение)	He <sub>обм</sub> , 10 <sup>-4</sup> см <sup>3</sup> /г	Ra, 10 <sup>-12</sup> г/г	Th, 10 <sup>-8</sup> г/г	He <sub>рад</sub> , 10 <sup>-4</sup> см <sup>3</sup> /г	He <sub>10-4</sub> , 10 <sup>-4</sup> см <sup>3</sup> /г
Берилл (европейская часть СССР)	384	0,34	6,9	42,5	341
Берилл (Средняя Азия)	402	0,10	—	0,7	401
Берилл (Урал)	52	0,41	1,2	5,1	46
То же	30	0,02	1,0	0,9	30
То же	20	0,04	1,0	1,1	19
Воробьевит (Урал)	4,2	0,02	—	0,2	3
Хризоберилл (Урал)	2,2	0,04	—	0,3	1,9
Турмалин (Урал)	6,1	0,05	0,9	1,2	4,9

Дальнейшими исследованиями В. Г. Хлопина и С. А. Абидова [1941], В. В. Чердынцева и Л. В. Козака [1949] и других это предположение было подтверждено и дополнено новыми доказательствами.

Избыточный гелий найден не только в бериллиевых, борных и литиевых минералах, он возможен почти во всех минералах. В табл. 23 приведены некоторые данные Харлея и Гудмана [1943] об избыточном высоком содержании гелия в оливине, норите и пирротине, возраст которых, рассчитанный гелиевым методом, дал очень высокие цифры — свыше 10 млрд. лет.

Природные газы являются единственным рентабельным источником получения гелия в промышленных масштабах, в связи с этим их гелиеносность изучена относительно хорошо, хотя и крайне

Таблица 23

Избыток гелия в отдельных минералах Седбери, Канада [Hurley, Goodman, 1943]

Образец	He, 10 <sup>-4</sup> см <sup>3</sup> /г	Ra, 10 <sup>-12</sup> г/г	Th, 10 <sup>-8</sup> г/г	Геол. возраст	Возраст по гелиевому методу, млн. лет
Диабазовый оливин	43,8	0,08	0,24	Докембрий	10 000
Норит	120	0,10	—	То же	< 36 000
Пирротин	3,8	0,01	0,01	»	> 12 000
То же	2,84	0,02	0,1	»	4 700

неравномерно. Имеющееся только в нашем распоряжении число анализов природных газов из различных регионов мира превышает 10 тыс. Концентрации гелия меняются в весьма широких пределах — от следов до 10—12% (об.) \* для свободных газовых скоплений и до 18—20% для спонтанно выделяющихся из вод источников. Детальные сведения о гелиеносности природных газов различного генезиса приведены в гл. V.

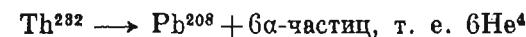
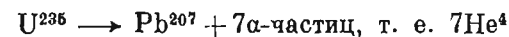
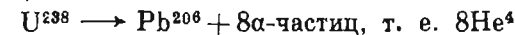
## § 2. ПРИРОДНЫЕ ИЗОТОПЫ ГЕЛИЯ

Известны два стабильных изотопа гелия — He<sup>3</sup> и He<sup>4</sup>. Наиболее распространен тяжелый изотоп He<sup>4</sup>.

Распространенность их в природных объектах крайне неравномерна. В атмосферном гелии легкого изотопа He<sup>3</sup> содержится всего лишь 1,9·10<sup>-4</sup>% от его общего количества, тогда как в метеоритах — около 10—30%.

Тяжелый изотоп гелия He<sup>4</sup> был обнаружен Томсоном еще в 1912 г. при анализе масс-спектров с помощью метода каналовых (положительных) лучей. Легкий изотоп гелия He<sup>3</sup> был обнаружен значительно позже, вначале как продукт ядерных реакций Олифантом, Гартеком, Резерфордом [Oliphant, Harteck, Rutherford, 1934], а затем, в 1939 г., Альваресом и Корногом [Alvarez, Cornog, 1939] как составляющая часть обычного гелия, имеющая очень незначительное распространение.

Изотоп He<sup>4</sup>, присутствующий в недрах Земли — в природных газах, горных породах и водах, является продуктом α-распада ядер тяжелых радиоактивных элементов. Каждый акт α-распада приводит к образованию 1 атома гелия. Общий ход превращений этих элементов следующий:



\* Здесь и далее приводятся объемные проценты.

Кроме того, небольшие количества  $\text{He}^4$  получаются в результате распада  $\text{Sm}^{147}$ .

Как известно,  $\alpha$ -частица состоит из двух протонов и двух нейтронов, весьма сильно связанных между собой. Она положительно заряжена, ее заряд по абсолютной величине в два раза больше заряда электрона. Атомный вес  $\alpha$ -частицы 4,003, масса  $6,644 \cdot 10^{-24}$  г.

Явление  $\alpha$ -распада заключается в выбрасывании  $\alpha$ -частицы ядром атома. В настоящее время принято считать, что  $\alpha$ -частица не является самостоятельной структурной единицей в составе атомных ядер [Глестон, 1961]. Четыре элементарные частицы, из которых она состоит (два протона и два нейтрона), участвуют в сложном движении частиц, слагающих ядро радиоэлемента, и не отличаются от других частиц ядра. Механизм образования  $\alpha$ -частицы внутри ядра в настоящее время не выяснен, можно лишь предположить, что  $\alpha$ -частица образуется в ядре только в момент испускания.

Силы притяжения, действующие внутри ядра, препятствуют выходу  $\alpha$ -частицы из ядра. Опытным путем установлено, что энергия  $\alpha$ -частиц при вылете из ядра в зависимости от природы ядер меняется от 4 до 10,6 Мэв, причем энергия  $\alpha$ -частиц обратно пропорциональна периодам полураспада радиоактивных элементов. Для того чтобы (в соответствии с правилами классической механики)  $\alpha$ -частица смогла покинуть ядро, она должна иметь энергию, равную (или большую) силам ядерного взаимодействия, т. е. примерно 25—28 Мэв для элемента с высоким атомным номером. Естественно, что энергии  $\alpha$ -частиц 4—10 Мэв недостаточно для преодоления того потенциального барьера, который создает силовое поле ядра. Однако существуют такие условия, когда  $\alpha$ -частица, несмотря на недостаточную энергию, все же выходит из-под сферы действия ядерных сил притяжения.

Вылетающая из ядра  $\alpha$ -частица, состоящая из двух протонов и двух нейтронов, представляет собой ядро атома гелия с двойным положительным зарядом.  $\alpha$ -частицы, проходя через вещество, ионизируют его, но постепенно теряют энергию, передавая ее электронам, с которыми они взаимодействуют, проникая сквозь электронную оболочку атомов или молекул. В структуре циркона, например, каждый  $\alpha$ -распад воздействует на  $4,5 \cdot 10^3$  атомов минерала. Отдельная  $\alpha$ -частица, испускаемая  $\text{RaC}^1$ , производит на своем пути в воздухе 237 тыс. пар ионов. На каждый положительный ион образуется один электрон [Линд, 1965].

В процессе ионизации  $\alpha$ -частица затрачивает энергию примерно 33,5 эв на каждую создаваемую ею пару ионов. Таким образом, в конце пути энергия, а следовательно, и скорость  $\alpha$ -частицы значительно уменьшаются. К замедляющейся  $\alpha$ -частице присоединяется сначала один электрон, что превращает ее в  $\text{He}^+$ , а затем и второй, с образованием нейтрального атома гелия. Существует непосредственная связь между скоростью испускания  $\alpha$ -частицы из источника (ее энергией) и расстоянием, которое она может пройти прежде чем потеряет способность к ионизации.

Для твердых тел это расстояние определяется микронами, для воздуха при нормальных условиях — 2,8—8,6 см. Величина пробегов  $\alpha$ -частиц в изверженных породах почти для всех естественных  $\alpha$ -излучателей заключена в интервале 15—45 мк. Тормозная способность различных веществ, отнесенная к одному атому вещества, поглощающего  $\alpha$ -частицы, приблизительно пропорциональна квадратному корню их атомного веса.

Постоянно идущие в недрах процессы  $\alpha$ -распада радиоактивных элементов и являются основным источником образования тяжелого изотопа гелия на Земле.

В результате работ по поискам трития Альварес и Корног [Alvarez, Cornog, 1939] обнаружили, что этот радиоактивный изотоп водорода с массой 3 является отрицательным  $\beta$ -излучателем, который имеет период полураспада 12,46 лет и переходит в стабильный редкий изотоп гелия с массой 3. В том же 1939 г. они обнаружили присутствие  $\text{He}^3$  в атмосферном гелии и в гелии газовых скважин.

Широкая распространенность гелия во Вселенной позволяет предположить, что в природе возможно существование первичного гелия, не связанного ни с какими процессами распада более сложных элементов. Одновременно с этим общеизвестны процессы радиоактивного распада целого ряда элементов, а также ядерных реакций, продуктом которых является гелий.

Возможно, гелий, заполняющий вместе с водородом космическое пространство и присутствующий во многих слутках материи во Вселенной, является смесью гелия как первичного, так и вторичного происхождения. Естественно предположить, что гелий, присутствующий на Земле, практически весь имеет вторичное происхождение (см. гл. IV) и обязан своим возникновением различным процессам радиоактивного распада и ядерным реакциям.

**Изотопы гелия в космосе.** Мы не располагаем сведениями об относительной распространенности изотопов гелия в межзвездном газе, но имеются основания полагать, что роль  $\text{He}^3$  в общем балансе космического гелия значительно выше, чем в земном. По данным Гринштейна [Greenstein, 1951], отношение  $\text{He}^3/\text{He}^4$  в звездах меньше 0,01.

Особую научную ценность представляет изучение изотопных соотношений гелия в земных космических объектах — метеоритах. Определяя возраст метеоритов по данным о соответственном содержании тяжелых радиоактивных элементов и гелия, исследователи установили, что гелий в метеоритах может накапливаться не только как продукт ядерного распада, но также и под воздействием космического облучения. Причем в результате столкновения космических лучей с метеоритами могут образоваться оба изотопа гелия как легкий, так и (что более важно для геохронологических исследований) тяжелый, следовательно, данные о возрасте метеоритов, рассчитанные гелиевым методом, могут оказаться завышенными.

Изучение изотопных отношений гелия в метеоритах различного состава, проведенное многими исследователями, показало, что

отношение  $He^3/He^4$  в метеоритном гелии, составляющее в среднем 0,315%, значительно выше, чем в земных источниках, например в атмосферном гелии, равном  $(1,2-1,3) \cdot 10^{-6}$ .

**Изотопы гелия в атмосфере.** Общепринято, что распространенность стабильных изотопов гелия в атмосфере составляет  $1,3 \cdot 10^{-4}\%$  для  $He^3$  и 99,9999% для  $He^4$ . Отношение  $He^3/He^4$  в атмосферном гелии колеблется по различным данным от  $10 \cdot 10^{-7}$  до  $13 \cdot 10^{-7}$ . В соответствии с современными представлениями формирование существующего изотопного соотношения и баланса гелия в атмосфере происходит за счет следующих факторов.

Основная масса гелия поступает из литосферы при различных процессах ее дегазации (выветривание, диффузия, газовые струи и т. п.). Соотношение между изотопами в гелии, поступающем в атмосферу из земной коры, составляет, по Майну [Rankama, 1963], примерно  $10^{-9}$ . Следовательно, основная масса гелия, поступающего из недр, состоит из его тяжелого изотопа  $He^4$ .

Образование изотопов  $He^3$  и  $He^4$  происходит также и в самой атмосфере в результате космической радиации и ядерных реакций. Большая часть  $He^3$  здесь, по-видимому, космического происхождения.  $He^3$  образуется как непосредственно при ядерных реакциях, так и косвенно как продукт распада космического трития. Непосредственное образование гелия в атмосфере происходит под воздействием космической радиации.

Одновременно с поступлением гелия в атмосферу из различных источников происходит и его постоянная потеря в космическое пространство, его диссипация.

Все газовые молекулы удерживаются гравитационным полем Земли, и лишь наиболее легкие из них — водород и гелий — в связи с высокой скоростью атомов в самых верхних слоях эквотосферы преодолевают гравитационное притяжение и покидают атмосферу (см. гл. IV).

Принимая во внимание меньшую массу и более высокую атомную скорость  $He^3$ , Николе [Nicolet, 1957] подсчитал, что возможность утечки  $He^3$  из атмосферы в 100 раз больше, чем  $He^4$ . Таким образом, современное количество гелия в атмосфере и его изотопное соотношение  $12 \cdot 10^{-7}$  определяются тем динамическим равновесием, которое установилось в земной атмосфере в результате действия всех перечисленных выше факторов.

**Изотопы гелия в литосфере.** Различные природные объекты характеризуются весьма неодинаковым количеством обнаруженного в них легкого изотопа гелия.

Изучение относительной распространенности изотопов гелия в недрах, проведенное многими исследователями, показало, что  $He^3$  присутствует практически повсеместно. Больше всего его в сподуменах, имеется он также в минералах бериллия и бора. Не обнаружен легкий изотоп гелия только в радиоактивных минералах. В природных газах  $He^3$  содержится в количествах, примерно в 10 раз меньших, чем в атмосферном воздухе (табл. 24).

В среднем величина отношения между тяжелым и легким изотопом гелия в земной коре составляет примерно  $10^{-7}-10^{-8}$  [Mayne, 1956].

Таблица 24

Отношение  $He^3/He^4$  в земном гелии, по Ранкама [1956]

Источник гелия	$(He^3/He^4) \cdot 10^7$	Публикация
Берилл, Вест-Рамни, шт. Нью-Гемпшир, США . . . . .	12,0	Олдрич, Нир [1948]
Сподумен, рудн. Эдисон, шт. Юж. Дакота, США . . . . .	120,0	То же
Минералы бериллия, бора и лития . . . . .	0,5—12,0	В. Г. Хлопин [1949]
Урановая смоляная обманка, Бол. Медвежье озеро, Канада . . . . .	0,3 *	Олдрич, Нир [1948]
Уранинит, Яхимов, Чехословакия . . . . .	0,3 *	То же
Уранинит . . . . .	0,001 *	В. Г. Хлопин, Э. К. Герлинг [1948]
Гелий, получаемый искусственно при ядерном делении . . . . .	0,002	В. Г. Хлопин [1949]
Гелий из атмосферного воздуха, США . . . . .	12,0	Олдрич, Нир [1948]
Природный газ, Амарилло, шт. Техас, США . . . . .	0,6	То же
То же, Клиффсайд, шт. Техас, США . . . . .	1,5	»
» , Раттленейк, шт. Нью-Мексико, США . . . . .	0,5	»
Товарный гелий . . . . .	1,4	»
Гелий из газовых скважин (вычислено)	≈ 2,0	Моррисон, Бирд [1949]

\* Легкий изотоп в гелии, извлеченном из радиоактивных руд, не обнаружен. Верхний предел содержания  $He^3$  определялся уровнем шума усилителя во время работы масс-спектрометра, т. е. величина пика  $He^3$ , если он присутствовал, находилась за пределами точности измерения.

Необходимо отметить, что исследование изотопного состава гелия сопряжено со значительными техническими трудностями в связи с наблюдаемыми явлениями дискриминации в масс-спектрометрах, обусловленными большой разницей в содержании масс  $He^3$  и  $He^4$ . Поэтому число выполненных изотопных анализов гелия в настоящее время остается незначительным. Однако совершенно очевидно, что распространение  $He^3$  в земном гелии крайне незначительно. Его содержание меньше, чем в метеоритах, примерно в 10 раз меньше, чем в воздухе, и только в литиевых минералах — сподуменах — относительное содержание  $He^3$  превышает воздушное, составляя однако не более тысячной доли процента от полученного из них общего количества гелия.

Имеются различные источники накопления  $\text{He}^3$  на Земле. Не исключено (хотя и весьма сомнительно), что какая-то незначительная часть  $\text{He}^3$  на Земле является первичной по своему происхождению, т. е. захваченной веществом Земли при формировании планеты. Если учесть весьма высокие диффузионные свойства легкого изотопа гелия и длительность геологической истории, на протяжении которой идет процесс диффузии гелия и его рассеивания в космическом пространстве, то вряд ли следует считать долю остаточного количества предпланетного  $\text{He}^3$  в его общем балансе на Земле сколько-нибудь существенной.

## Глава IV

### ИСТОЧНИКИ, МЕХАНИЗМ И МАСШТАБЫ НАКОПЛЕНИЯ ГЕЛИЯ

Изучением вопросов происхождения гелия и его баланса неоднократно занимались многие исследователи при обсуждении различных вопросов эволюции земной атмосферы и ее возраста, исследовании возраста пород и минералов, эволюции химических элементов и т. п.

Большое внимание при этом уделялось изучению источников образования и поступления гелия в земную атмосферу и связанному с этим расчету количественной роли отдельных элементов гелиевого баланса как в литосфере, так и в атмосфере. В этом направлении особенно выделяются работы Э. К. Герлинга [1936], А. П. Виноградова [1964], Дамона и Калпа [Damon, Kulp, 1958], Ранкама и Сахама [Rankama, Sahama, 1950], М. Николе [Nicolet, 1957], Моррисона и Пайна [Morrison, Johnston, 1955] и многих других исследователей. Целый ряд работ посвящен оценке возраста минералов и пород по данным о содержании в них радиоактивных элементов и гелия. И лишь в немногих работах рассматривается роль отдельных элементов баланса гелия в его накоплении в осадочной толще, причем, как правило, ограничиваются либо только постановкой вопроса о неясности источников продуктивного гелиенакопления во флюидах осадочных толщ (Cook, 1961), либо рассматривают отдельные стороны этой проблемы [Ньютон, Роунд, 1961].

Принимая во внимание, что при решении вопросов о генезисе гелиевых месторождений и формировании зон регионального гелиенакопления именно эти вопросы представляют наибольший интерес, остановимся на них подробнее.

Существует несколько источников гелия на Земле, среди которых отдельные достаточно хорошо изучены, тогда как существование других либо вообще проблематично, либо о них имеются лишь самые общие представления.

В табл. 25 перечислены основные источники гелия на Земле. Не исключено, что имеются и другие, неизвестные в настоящее время источники его поступления, но их значение в гелиевом балансе Земли вряд ли будет существенным. Подавляющая же масса гелия Земли — 99,9999% — представлена его тяжелым изотопом, образовавшимся при  $\alpha$ -распаде естественных радиоактивных элементов. Соотношение изотопов гелия в атмосфере составляет  $12 \cdot 10^{-7}$  и примерно  $10^{-8}$  в литосфере. Следовательно, в общем балансе гелия на Земле его легкий изотоп играет крайне незначительную роль.

Таблица 25

Основные источники гелия на Земле

Изотоп	Источники поступления или образования	
	в литосфере	в атмосфере
He <sup>4</sup>	α-излучающий радиоактивный распад Первичный, окклюдированный породами Земли	Поступление из литосферы
	Поступление из космоса вместе с межпланетной пылью, метеоритами и другими космическими телами	Поступление из космоса в виде α-частиц как составной части космического излучения Поступление из космоса вместе с межпланетной пылью, метеоритами и другими космическими телами
He <sup>3</sup>	Радиоактивный распад трития, образующегося при различных нейтронных реакциях в недрах	Радиоактивный распад трития, поступающего из космоса и образующегося в атмосфере при различных ядерных реакциях под воздействием космического излучения
	Первичный, окклюдированный породами Земли Поступление из космоса вместе с межпланетной пылью, метеоритами и другими космическими телами	Образование при ядерных реакциях под воздействием космической реакции Поступление из космоса вместе с межпланетной пылью, метеоритами и другими космическими телами Поступление из литосферы

В последующих разделах главы будут рассмотрены механизм и масштабы образования каждого из отдельных составляющих элементов гелиевого баланса и его роль в общем балансе гелия Земли.

### § 1. МАСШТАБЫ ГЕНЕРАЦИИ ГЕЛИЯ В НЕДРАХ ПРИ АЛЬФА-ИЗЛУЧАЮЩЕМ РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ

Многие исследователи полагают, что радиоактивность является общим свойством всех химических элементов, но для большинства из них периоды полураспада столь велики, что современными методами определены быть не могут. Среди элементов с установленной α-активностью, помимо рядов урана, актиноурана и тория, находятся также Sm<sup>147</sup>, распадающийся с излучением α-частицы в Nd<sup>143</sup> ( $T = 1,25 \cdot 10^{11}$  лет), W<sup>180</sup>, дающий Hf<sup>176</sup> при распаде с  $T = 2,2 \cdot 10^{17}$  лет, Bi<sup>209</sup>, образующий при α-распаде Tl<sup>205</sup> ( $T = 2,7 \cdot 10^{17}$  лет). Однако масштаб образования гелия этими α-излучателями в связи с их крайне незначительной активностью несравненно ниже, чем тяжелыми радиоактивными элементами. Учитывать их долю участия в общем процессе образования гелия при той точности расчёта элементов гелиевого баланса, которая может быть достигнута на современном

уровне знаний, по-видимому, нет оснований. Исключение будет сделано лишь для Sm<sup>147</sup> с самым коротким (относительно других элементов средней группы таблицы Менделеева) периодом полураспада.

Родоначальник уранового радиоактивного ряда — U<sup>238</sup> — составляет 99,2739% общего количества природного урана. Он имеет период полураспада  $T = 4,51 \cdot 10^9$  лет. При распаде из каждого атома урана образуется 8 атомов гелия. Актиноуран (U<sup>235</sup>) присутствует в природном уране в количестве 0,7205% с периодом полураспада  $7,13 \cdot 10^8$  лет, он дает 7 атомов гелия из каждого своего распавшегося атома. Торий (Th<sup>232</sup>) с периодом полураспада  $1,39 \cdot 10^{10}$  лет дает 6 атомов гелия. Самарий (Sm<sup>147</sup>) присутствует в природном самарии в количестве 14,97%. При распаде с периодом полураспада в  $1,25 \cdot 10^{11}$  лет один атом Sm<sup>147</sup> образует один атом гелия.

### Образование гелия радиоактивными элементами

В зависимости от степени активности радиоактивного элемента разные α-излучатели дают неодинаковое число ионов гелия в единицу времени.

Величина активности измеряется удельной активностью, которая соответствует числу распадов 1 г вещества в единицу времени. Она определяется числом атомов, входящих в 1 г радиоактивного элемента, и периодом его полураспада.

$$n = N\lambda = \frac{0,693N}{T},$$

где  $n$  — удельная активность радиоактивного элемента, *расп/сек*;  $N$  — число атомов в 1 г радиоактивного элемента;  $N = \frac{\text{число Авогадро}}{\text{атомный вес}} = \frac{6,024 \cdot 10^{23}}{A}$ ;  $\lambda$  — постоянная распада радиоактивного элемента, *сек<sup>-1</sup>*;  $T$  — период полураспада радиоактивного элемента, *сек*;  $T = \frac{0,693}{\lambda}$ .

При каждом элементарном распаде α-излучателя образуется одна α-частица, т. е. один ион гелия.

Расчет образующегося количества α-частиц при радиопревращениях урана и тория вместе с промежуточными продуктами распада, а также Sm<sup>147</sup> показал, что 1 г равновесной смеси урана, состоящей из U<sup>238</sup> и U<sup>235</sup>, вместе с продуктами их распада излучает  $10,2436 \cdot 10^4$  α-частиц в секунду, т. е. ионов гелия, в 1 г тория —  $2,3105 \cdot 10^4$  α-частиц в секунду. Самарий излучает  $1,08 \cdot 10^3$  ионов гелия в секунду. Переход от атомных единиц к весовым и объемным можно произвести по формулам

$$p = \frac{NA}{6,024 \cdot 10^{23}} \text{ и } V = \frac{22414N}{6,024 \cdot 10^{23}},$$

где  $p$  — количество элемента в граммах;  $N$  — число атомов элемента;  $A$  — атомный вес;  $6,024 \cdot 10^{23}$  — число Авогадро;  $V$  — количество элемента, *см<sup>3</sup>*; 22414 — объем грамм-молекулы газа при нормальных условиях, *см<sup>3</sup>*.



Результаты расчета масштабов образования гелия при радиоактивных превращениях урана, тория и самария приведены в табл. 26. Количество гелия, образующееся из самария, примерно в тысячу раз меньше, чем из урана.

Таблица 26

Образование гелия при радиоактивных превращениях урана, тория и самария

Радиоизотопы в равновесных количествах	Количество гелия, образующегося из 1 г радиоактивного элемента в год		
	атомы, $10^{10}$	г, $10^{-13}$	см <sup>3</sup> , $10^{-9}$
U <sup>238</sup> + U <sup>235</sup>	323,0425	214,5038	120,1977
Th <sup>232</sup>	72,8646	48,3828	27,1115
Sm <sup>147</sup>	0,340	0,2257	0,1265

### Изменение содержания радиоактивных элементов во времени

В соответствии с законом радиоактивного распада общее количество атомов радиоактивных элементов во времени непрерывно уменьшается.  $\alpha$ -излучающие радиоактивные элементы семейства урана, актиноурана и тория обладают разной устойчивостью. Одни из них распадаются быстро, другие медленно. Так, например, период полураспада U<sup>238</sup> — 4,5 млрд. лет, U<sup>235</sup> — 0,71 млрд. лет, а Th — 13,89 млрд. лет. Кроме того, первоначально Земля содержала неизвестное количество трансурановых элементов с периодом полураспада, меньшим  $10^8$  лет, исчезнувших к настоящему времени. Все они распадались главным образом путем  $\alpha$ -излучения, т. е. образовывали гелий.

Трансурановые элементы ныне не обнаружены, но искусственно они были получены. Среди них особенно выделяется радиоактивное нептуниевое семейство ( $4n + 1$ ), один из его представителей, изотоп Np<sup>237</sup>, имеет наибольший период полураспада —  $2,2 \cdot 10^6$  лет. Следовательно, в прошлые геологические эпохи количество радиоактивных элементов было значительно большим, чем в настоящее время.

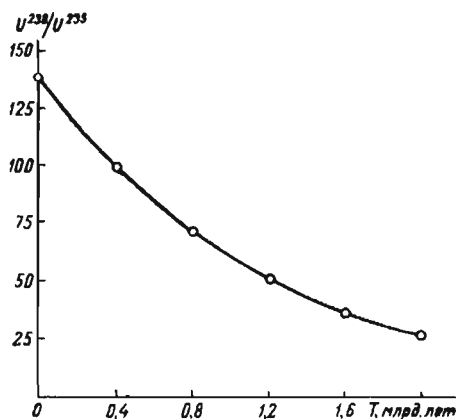


Рис. 2. Изменение величины отношения  $U^{238}/U^{235}$  во времени, по Ниру, 1937 [Старик, 1961].

Среди них особенно выделяется радиоактивное нептуниевое семейство ( $4n + 1$ ), один из его представителей, изотоп Np<sup>237</sup>, имеет наибольший период полураспада —  $2,2 \cdot 10^6$  лет.

Следовательно, в прошлые геологические эпохи количество радиоактивных элементов было значительно большим, чем в настоящее время.

время, причем в связи с различной скоростью распада их соотношения были иными.

В настоящее время отношение изотопов  $U^{238}/U^{235}$  равно  $139 \pm 1$ . Анализ отношений этих изотопов в минералах различного возраста, выполненный Ниру в 1937 г. [Старик, 1961], показал, что ранее оно было значительно меньше, чем в настоящее время (рис. 2).

А. П. Виноградов [1964] подсчитал, что свыше 5 млрд. лет назад количество радиоактивных элементов могло быть так велико, что выделенного при их распаде радиогенного тепла хватило бы, чтобы превратить нашу планету в раскаленный газ.

Вместе с иными количественными характеристиками радиоактивных элементов иными были и гелиеобразующие возможности вещества Земли в прошлые эпохи ее истории, они были значительно выше современных, причем не только за счет большего количества известных в настоящее время элементов и иного их изотопного соотношения, но также и за счет трансурановых элементов, ранее существовавших, но полностью распавшихся к настоящему времени.

### Некоторые закономерности современного распространения радиоактивных элементов

#### РАДИОАКТИВНОСТЬ ПОРОД И НЕФТЕЙ

Радиоактивные элементы распространены в земной коре повсеместно, но с высокой степенью рассеяния. По мнению Адамса (1959), интенсивность ядерных излучений пород литосферы варьирует в широких пределах, от весьма высоких для рудных залежей до почти нулевого уровня над залежами каменной соли, однако осредненная по большим объемам радиоактивность литосферы изменяется не более чем в два-три раза.

Концентрация радиоактивных элементов семейства урана, актиноурана и тория в земной коре весьма незначительна, хотя и больше, например, чем таких элементов, как золота, серебра, ртути и многих других. Среднее содержание урана в земной коре до глубины 16 км принимается разными исследователями равным  $(2 \div 4) \cdot 10^{-4}\%$  (по весу), тория —  $(7 \div 15) \cdot 10^{-4}$ . Различия в указанных значениях обусловлены главным образом разницей в средних величинах концентраций урана и тория, принимаемых для базальтов, и их распространенностью в литосфере.

По данным Адамса [1964], в наиболее распространенных породах доступной части литосферы — гранитах и глинах — содержится  $(11 \div 15) \cdot 10^{-6}$  г/г тория и  $(3 \div 4) \cdot 10^{-6}$  г/г урана. Эти же значения представляют, по его мнению, средние концентрации для всей доступной части литосферы, поскольку статистический вес прочих горных пород и соответствующих им концентраций мал.

В табл. 27 приведены данные о среднем содержании основных  $\alpha$ -излучающих радиоактивных элементов в главных типах горных пород. Для сравнения приведены также данные по каменным

Таблица 27

Содержание радиоактивных элементов (вес. %) в главных типах горных пород [по А. П. Виноградову, 1962]

Радиоактивный изотоп	Силикатная фаза каменных метеоритов—хондритов	Ультраосновные породы (дуниты, перидотиты, пироксениты)	Основные породы (базальты, габбро, нориты, диабазы и др.)	Средние породы (диориты и андзиты)	Кислые породы (граниты, липариты, риолиты и др.)	2 части кислых пород, 1—основных	Осадочные породы (глины и сланцы)
Po <sup>210</sup> Rn <sup>222</sup>	7,4 · 10 <sup>-18</sup> 2,2 · 10 <sup>-17</sup>	2,2 · 10 <sup>-16</sup> 6,5 · 10 <sup>-18</sup>	5,9 · 10 <sup>-16</sup> 1,7 · 10 <sup>-16</sup>	1,3 · 10 <sup>-14</sup> 3,9 · 10 <sup>-16</sup>	2,6 · 10 <sup>-14</sup> 7,6 · 10 <sup>-16</sup>	2 · 10 <sup>-14</sup> 6 · 10 <sup>-16</sup>	2,4 · 10 <sup>-14</sup> 6,5 · 10 <sup>-16</sup>
Ra <sup>226</sup> Ac <sup>227</sup>	3,4 · 10 <sup>-12</sup> 2,1 · 10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-11</sup> 6,4 · 10 <sup>-16</sup>	2,7 · 10 <sup>-11</sup> 1,7 · 10 <sup>-14</sup>	6 · 10 <sup>-11</sup> 3,8 · 10 <sup>-14</sup>	1,2 · 10 <sup>-10</sup> 7,4 · 10 <sup>-14</sup>	9 · 10 <sup>-11</sup> 5,5 · 10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-10</sup> 6,8 · 10 <sup>-14</sup>
Th <sup>232</sup> Ra <sup>231</sup> U <sup>238</sup>	10 <sup>-4</sup> 3,5 · 10 <sup>-12</sup> 10 <sup>-5</sup>	5 · 10 <sup>-7</sup> 10 <sup>-12</sup> 3 · 10 <sup>-7</sup>	3 · 10 <sup>-4</sup> 2,7 · 10 <sup>-11</sup> 5 · 10 <sup>-5</sup>	7 · 10 <sup>-4</sup> 6,2 · 10 <sup>-11</sup> 1,8 · 10 <sup>-4</sup>	1,8 · 10 <sup>-3</sup> 1,2 · 10 <sup>-10</sup> 3,5 · 10 <sup>-4</sup>	1,3 · 10 <sup>-3</sup> 9 · 10 <sup>-11</sup> 2,5 · 10 <sup>-4</sup>	1,1 · 10 <sup>-3</sup> 1,1 · 10 <sup>-10</sup> 3,2 · 10 <sup>-4</sup>
Th/U	10	—	3,75	3,9	5,15	5,0	3,4

метеоритам. Среднее содержание самария в изверженных породах равно  $6,47 \cdot 10^{-3}$  г/г, а в гранитах примерно  $17,8 \cdot 10^{-3}$  г/г.

Как видно из таблицы, общим свойством для всех радиоактивных элементов является увеличение их количеств параллельно с увеличением в них содержания силикатов. Причиной наибольшего кларка урана и тория в кислых силикатных породах является их геохимическое сходство с литофильными элементами. Литофильные элементы (щелочные, щелочноземельные, Al, Si, P, TR и другие, внешние оболочки атомов которых построены по типу инертных газов) слагают в основном литосферу, связаны они преимущественно с O<sub>2</sub> в виде окислов и особенно силикатов. В структуру силикатов уран и торий входят изоморфно. Их накопление в остаточном кислом расплаве магмы связано с крупными размерами ионов и их химическими свойствами, не позволившими урану и торью осадиться в виде самостоятельных минералов среди основных породообразующих минералов или образовать с ними изоморфные соединения. Не найдя себе места в кристаллических решетках минералов ранних стадий кристаллизации магмы, уран и торий накапливались в ее остаточном расплаве и оказались в конечном итоге в застывшей эвтектической смеси [Новиков, Капков, 1965; Ларсен, Фейер, 1956].

Многие исследователи отмечают, что чем моложе абсолютный возраст однопородных изверженных пород (в пределах одного региона), тем больше в них содержание радиоактивных элементов. Это возрастание содержания урана в магматических породах последних стадий формирования находит свое объяснение в специфике отдельных этапов общего хода тектоно-магматического процесса. Обычно для начальных и ранних этапов развития подвижных зон земной коры характерны интрузии основных и ультраосновных пород. Самые ранние дифференциаты магмы состоят главным образом из оливина,

пироксена и основных плагиоклазов, имеющих в своих решетках крайне ничтожные количества урана, обычно меньше, чем 10<sup>-4</sup>%. Такие породы обладают и наименьшими концентрациями радиоактивных элементов.

Чем позже этап внедрения, тем выше кислотность общего состава интрузий, тем выше в них содержание радиоактивных элементов. Причем больше всего урана накапливается в наиболее поздних кислых дифференциатах магматических очагов гранитного состава [Билибин, 1957].

Степень изученности радиоактивности эффузивных пород незначительна, но в целом по имеющимся сведениям можно предположить, что ураноносность эффузивных пород несколько выше, чем интрузивных при одном и том же их составе.

Клеппер и Уайт [1956] полагают, что эффузивные породы обычно в 1,5—2 раза более ураноносны, чем их интрузивные аналоги. Содержание урана в эффузивах возрастает параллельно с возрастанием содержания калия, т. е. с увеличением кислотности пород.

Концентрации радиоактивных элементов в осадочных породах весьма разнообразны. Наиболее высокое содержание урана характерно для глинистых пород. Уровень радиоактивности глин примерно равен уровню радиоактивности гранитов. Наименьшей радиоактивностью обладают солевые отложения — галит, гипс и др.

Некоторые сведения о содержании урана и тория в различных типах осадочных пород приведены в табл. 28. Многие морские черные сланцы содержат 0,005—0,02% урана [Маккелви, Эверхарт, Гаррелс, 1956]. Максимальная его концентрация — 0,5% — обнаружена в линзовидных залежах темного битума (кольм) кембрийских кварцевых сланцев. Ураноносные морские черные сланцы характеризуются обычно высоким содержанием углерода и битумов.

Породы	U, 10 <sup>-4</sup> %		Th, 10 <sup>-4</sup> %		Th/U		Число образцов	Число определений
	Среднее	Пределы колебаний	Среднее	Пределы колебаний	Среднее	Пределы колебаний		
Кластические: глинистые породы черные сланцы ортокварциты . . .	3,7 ± 0,5	1-13 1,4-80 0,2-0,6	12	2-47 2,8-28 0,7-2,0	3,8 ± 1,1	1-12 0,07-12 1,8-5,8	4847 350 18	230 8 18
	0,45 ± 0,05		1,7 ± 0,1		4,0 ± 0,8			
Остаточные: бокситы . . . . . бентониты . . . . .	8,0 5,0	3-27 1-21	42 24	8-132 6-44	6,9 5,8	1,5-22 1,0-21	26 69	26 69
Хемогенные и биогенные: карбонатные породы галит . . . . . ангидрит . . . . . фосфатная порода	2,2 ± 0,1	0,1-9 0,1-0,2 0,1 245	1,7 ± 0,7	0,1-7 0,4-0,5 0,15 3,9	1 ± 0,3	0,1-6,5 1-5 1,5 0,02	6045 3 1 1	218 3 1 1
Глина (Русская платформа) . . . . . Карбонатные породы (Русская платформа) . . . . . Илы Индийского океана . . . . . Илы Тихого океана**	4,1 2,1 — —	3,2-5,9* 1,2-5,4* 0,1-2,2 1,0-8,0	14,0 2,4 — —	7,7-14,2* 1,0-7,1* 0,4-10,6 0,6-10,0	2,7 1,1 — —	2,04-4,1* 0,3-2,8* 1-16 0,17-3,9	4795 5475 — —	178 128 20 31

По данным Адамса и др. (1959)

По данным В. И. Баранова и др. [1956, 1958]

\* Средние содержания в различных геологических системах, от риффа до кайнозоя.  
\*\* Анализировались илы Курило-Камчатской впадины.

Широкие изменения концентраций радиоактивных элементов характерны для каустобиолитов, в которых они изменяются от кларковых до высоких.

Основная масса промышленных месторождений угля, нефти и горючих сланцев имеет невысокое содержание урана. По данным Е. С. Буржера [1934], высокосортные каменные угли Куабасса и Донбасса содержат меньше радиоактивных элементов, чем другие типы осадочных пород. Однако некоторые из углей содержат примерно от 0,005 до 0,2% урана.

Неогеновые нефти Азербайджана содержат уран в количестве от  $10^{-7}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  г/л, а их зола —  $10^{-4}$ — $10^{-5}$ % [Алекперов, Эфендиев, 1959]. Однако отдельные месторождения нефтей и битумов характеризуются более высокими концентрациями урана. Хейл, Майерс и Хорр [1958] определили содержание урана в 200 образцах золы нефтей США. Его содержание колебалось в пределах 0,01—0,0376%. В золе нефтей 26 месторождений США отмечается 0,01% урана [Пирс и др., 1958, 1959]. Спектрографическое исследование асфальтитового материала из 8 штатов США показало в ряде случаев значительные количества урана в золе нефти, экстрагированной из ряда проб. Содержание урана (%) в золе нефти, экстрагированной из асфальтитов США, следующее, по Керру [1956]: в Калифорнии на участках Чалоун-Крик — 0,50; Маккиттрик — 0,15; Эдна — 1,90; Лоск-Аламос — 0,33; в Юте (Вернал) — 0,15; в Оклахоме (Сульфур) — 0,22; в Миссури (Эллис) — 0,41. В целом среднее содержание урана в золе всех проб, отобранных из 49 мест 8 штатов, менялось в пределах от 0,028 до 0,376%.

Выходы нефти на поверхность и нефтеносные породы обычно более обогащены ураном, чем сырая нефть, отбираемая из фонтанов.

Характерно, что известняки, обычно не содержащие значительных сингенетичных концентраций урана, в случаях, когда они обогащены углеродистым веществом, обладают необычной радиоактивностью. Так, черный, содержащий углеродистое вещество известняк Ла Луна из Венесуэлы, который считается в этом районе нефтепроизводящим, обладает наибольшей радиоактивностью и является, вероятно, самой ураноносной формацией в этом районе [Smith, 1951]. Черные радиоактивные известняки обнаружены также и на Среднем Востоке.

Отсутствие урана в известняках, не содержащих углеродистых веществ, объясняется тем, что уран, присутствующий в морских водах, насыщенных карбонатами в виде уранил-карбонатного комплекса, остается в растворе, когда карбонаты осаждаются. Однако присутствие в известняке углеродистых веществ, отлагавшихся вместе с ним, приводит к абсорбции урана из морской воды, содержащей его повышенные количества, и к удержанию его в осаждающемся карбонат-углеродистом комплексе [Брегер, Дьюл, 1956]. Углеродистые конкреции и вкрапления, которые встречаются в районе Пенхендл (штат Техас, США) в доломитах и известняках

от раннепенсильванского до позднепермского возраста содержат повышенные концентрации урана, иногда до 10% и более.

Морские фосфориты содержат от 0,005 до 0,03% урана. Для многих из них характерно увеличение содержания урана вместе с увеличением содержания фосфата. Исключения составляют фосфатсодержащие известняки, для которых характерны невысокие содержания урана.

Очень большое значение для накопления урана в отдельных типах осадочных отложений имеют процессы сорбции. Согласно исследованиям В. В. Щербини [1956], сорбируемость урана возрастает в ряду: песчаники, известняки, глины, бурые железняки, фосфориты, углистые породы и угли. Именно процессами сорбции объясняется в ряде случаев отмечаемое нередко высокое содержание урана в каустобиолитах и битумах.

Интересные исследования зависимости радиоактивности осадочных горных пород от их глинистости выполнены Ю. И. Сериковым [1963] и А. Л. Ковалевским [1966]. Изучение количественной стороны этой зависимости, выполненное А. Л. Ковалевским для четвертичных осадочных пород Западно-Сибирской низменности, показало, что песчанистым фракциям (0,06—0,30 мм) свойственна низкая  $\alpha$ -активность, около  $(1,2 \div 1,6) \cdot 10^{-4}$ % эквивалентного урана; глинистым ( $< 0,007$  мм) — более высокая  $\alpha$ -активность, измеряемая в среднем от  $8,6 \cdot 10^{-4}$  до  $11,4 \cdot 10^{-4}$ % эквивалентного урана.

Радиоактивность метаморфических пород меняется в широких пределах в зависимости от первоначальной концентрации в них радиоактивных элементов, а также глубины и направления последующих процессов метаморфизма. Среди метаморфических пород наибольшие концентрации урана связаны с кварцевыми сланцами и филлитами, причем нередко отмечается, что чем выше в них содержание графита, тем больше и урана.

Следует отметить, что однотипные породы в различных регионах характеризуются далеко не одинаковым содержанием радиоактивных элементов. Причем пределы изменения содержания радиоактивных элементов в одних и тех же породах на различных участках Земли весьма широки.

В ряде регионов отмечается не только общая повышенная радиоактивность всего комплекса отложений как изверженных, так осадочных и метаморфических, но и обнаруживаются самые разнообразные и разновозрастные месторождения урановых руд.

Если совокупность таких рудных проявлений отмечается на больших территориях, приуроченных к единой крупной геотектонической структуре второго порядка (части щита, платформы, складчатого пояса), то их принято называть металлогеническими и урановыми провинциями [Константинов, Куликова, 1960]. Причины возникновения урановых провинций в настоящее время еще мало ясны.

По представлениям Скерль [Skerl, 1957], металлогенические провинции имеют космическое происхождение и обязаны своим

образованием массовому падению метеоритного вещества в какие-то короткие интервалы времени. Эта гипотеза малоприемлема для объяснения происхождения урановых провинций, так как содержание радиоактивных элементов во всех исследованных метеоритах, как правило, значительно меньше, чем даже в обычных изверженных породах.

По данным Ранкама и Сахама [1950], среднее содержание урана и тория в 1 т изверженных пород составляет соответственно 4 и 11,5 г, а в 1 т метеоритного вещества — 0,36 и 0,8 г.

А. П. Виноградов [1958] полагает, что металлогенические провинции возникают при формировании земной коры путем выплавления вещества мантии Земли по типу зонной плавки. Обогащение теми или иными металлами различных областей коры обязано либо составу мантии, либо различным ходам процессов выплавления.

Аналогичной точки зрения придерживаются Клеппер и Уайт [1956], которые объясняют возникновение металлогенических провинций повышенной концентрацией металлов в земной коре, существовавшей с самого начала формирования данного участка коры.

М. М. Константинов и Е. Я. Куликова [1960] считают, что представления об устойчивом существовании металлогенических провинций, созданных еще в первые этапы формирования земной коры, не согласуются с геологическими данными. По их мнению, металлогенические провинции являются следствием региональной дифференциации вещества земной коры, способствующей избирательному распространению различных формаций горных пород и отдельных элементов в различных геотектонических элементах земной коры. Иначе говоря, металлогенические провинции фиксируют не первый этап возникновения земной коры и обогащения отдельных ее участков металлами, а более поздние эпохи жизни земной коры, когда ее вещество уже претерпело значительную дифференциацию.

В данном случае нам важно отметить, что существуют локальные области земной коры, которым свойственно более высокое содержание радиоактивных элементов по сравнению с кларковым, а наряду с ними, по-видимому, существуют и области более низкого содержания их, чем кларковое.

Принимая во внимание прямую генетическую взаимосвязь радиоактивных элементов и гелия, можно отметить, что урановые металлогенические провинции, интенсивно образующие гелий, могут являться одновременно и гелиевыми провинциями, тогда как области распространения пород с минимальным содержанием радиоактивных элементов — являются неблагоприятными для формирования и обнаружения гелиевых месторождений, хотя последние в них и не исключаются.

Необходимо обратить внимание и еще на одну особенность распространения зон максимального проявления урановой минерализации в осадочной толще земной коры — на их приуроченность к определенным геологическим эпохам. М. М. Константинов и Е. Я. Куликова [1960] намечают четыре главные урановые эпохи: 1) в верхнем

протерозое (Канадский щит); 2) в пермо-карбоне (Европа); 3) в верхней юре (часть месторождений Азии); 4) в верхнем мелу — палеогене (Великий Тихоокеанский пояс). Основная часть ураноносных провинций имеет герцинский и докембрийский возраст, причем наиболее мощные масштабы накопления урана в осадочных породах в промышленных концентрациях были в докембрии, тогда как в палеозое происходило накопление огромных запасов убогих руд.

#### РАДИОАКТИВНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Концентрация радиоактивных элементов в природных водах определяется их растворимостью, которая в свою очередь значительно колеблется в зависимости от физико-химических условий среды. Ториевые соединения весьма мало растворимы в воде, поэтому концентрация тория в водах значительно меньше, чем в горных породах.

В соответствии с данными многочисленных исследований крайние значения концентрации растворенного в природных водах урана варьируют от  $10^{-8}$  г/л для поверхностных вод до нескольких граммов на литр для подземных вод рудников.

В табл. 29 приведены данные о средних концентрациях в океане и континентальных водах  $\alpha$ -излучающих радиоактивных изотопов, а также наиболее вероятные пределы средних содержаний радия и урана в природных водах.

Таблица 29

Пределы средних содержаний радия и урана в природных водах [Токарев, Щербаков, 1956]

Воды	Ra, г/л	U, г/л
Поверхностные:		
океаны, моря, реки, озера	$(1 \div 2) \cdot 10^{-13}$ $10^{-12}$	$(6 \div 20) \cdot 10^{-7}$ $8 \cdot 10^{-6}$
Осадочных пород	$(2 \div 300) \cdot 10^{-12}$	$(2 \div 50) \cdot 10^{-7}$
Кислых магматических пород	$(2 \div 4) \cdot 10^{-12}$	$(4 \div 7) \cdot 10^{-6}$
Урановых месторождений	$(6 \div 8) \cdot 10^{-11}$	$(8 \div 600) \cdot 10^{-6}$

Пластовые воды нефтяных месторождений вне зависимости от литолого-стратиграфических и структурных особенностей месторождений содержат  $n \cdot 10^{-10}$  г/л радия, редко до  $10^{-8}$  или  $10^{-11}$  г/л. Содержание урана в них обычно низкое —  $10^{-7}$  г/л. Наибольшие концентрации урана в подземных водах отмечаются в зонах интенсивного водообмена, наибольшие концентрации радия — в зонах затрудненного водообмена.

Исследование содержания урана в нефтеносных рассолах США показало, что они содержат примерно  $0,2 \cdot 10^{-6}$  г/г урана. Рассолы содержат также и радий, отлагая осадки его солей в нефтепроводах [Керр, 1956].

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ГЕОСФЕРАМ ЗЕМЛИ

Вопрос о распределении радиоактивных элементов в Земле, по направлению к ее центру, связан с вопросом об образовании земных оболочек и их составом, по которому до сих пор единого мнения нет. Одни исследователи полагают, что ядро Земли имеет железный или железо-никелевый состав, по представлениям других, оно состоит из ультраосновных пород (оливина) в металлической фазе. Однако мнение об увеличении основности пород с глубиной является, по существу, общепринятым. Принимая во внимание геохимическое сродство урана и тория с силикатами и приуроченность последних к наружной гранитной оболочке земной коры, норвежский ученый В. М. Гольдшмидт высказал предположение, что радиоактивные элементы сосредоточены преимущественно в гранитной оболочке Земли, причем в основном в наиболее верхней ее части.

О преимущественной приуроченности радиоактивных элементов к земной коре свидетельствуют также и расчеты теплового баланса Земли. Впервые на радиоактивность горных пород, как на источник внутренней тепловой энергии Земли, обратил внимание английский геолог Джюли (1905). Выполненные им расчеты теплового баланса показали, что если бы концентрация радиоактивных элементов в глубоких сферах Земли соответствовала ее концентрации в земной коре, то тепловой поток, идущий к поверхности с глубин, должен был бы быть в несколько десятков раз большим, чем наблюдаемый в действительности. Это несоответствие дало основание Стретту еще в 1909 г. высказать предположение, что радиоактивные элементы сосредоточены лишь в самых верхних горизонтах Земли, до глубины примерно 40 км.

Хайд [1958] в результате расчетов скорости образования тепла, выполненных независимыми друг от друга методами, пришел к выводу, что средняя скорость образования тепла на каждый грамм вещества в Земле составляет  $3 \cdot 10^{-17}$  кал/сек, что соответствует всего  $3 \cdot 10^{-8}$  радиоактивного нагревания кислых изверженных пород. Это позволило Булларду предположить, что концентрации урана и тория в ядре должны быть низкими.

К выводу о приуроченности радиоактивных элементов к верхней геосфере можно прийти также и на основе свойств легкоплавкости и летучести соединений урана при процессах зонной плавки.

Другим подтверждением дифференцированного распределения радиоактивных элементов в геосферах служит значительно более низкая радиоактивность метеоритов по сравнению с кристаллическими породами литосферы как каменных, отождествляемых по

А так обстоит дело со всеми радиоактивными элементами? Радий и торий в основном сосредоточены в верхней оболочке?

составу с мантией, так и железных, предположительно близких по составу к ядру. На основе предположения о близости первоначального состава Земли к составу хондритовых метеоритов Паттерсон и другие исследователи [Patterson, Tulton, Inghram, 1953] пришли к выводу, что около 90% земного урана сконцентрировалось вблизи поверхности Земли в слое гранитных пород мощностью около 5 км.

Таким образом, дифференциация вещества Земли, способствующая его разделению на сферы с разной основностью пород в свою очередь способствовала и дифференциации в концентрации радиоактивных элементов по различным геосферам.

В табл. 30 приведены отдельные сведения о распределении радиоактивных элементов по различным объектам в соответствии с современными представлениями.

Таблица 30

Распределение радиоактивных элементов по геосферам

Геосфера	U, $10^{-6}$ г/г	Th, $10^{-6}$ г/г
По Г. В. Войткевичу [1956]		
Земная кора, гранитный слой . . . . .	4,00	13,5
То же, базальтовый слой . . . . .	1,00	4,0
Оболочка (на основе данных по каменным метеоритам) . . . . .	0,12	0,05
Ядро (на основе данных по железным метеоритам) . . . . .	0,003	0,01
По Д. И. Щербакову (1956)		
Гранитная (20 км) . . . . .	4,12	16,40
Базальтовая (40 км) . . . . .	0,82	3,30
Перидотитовая (1540 км) . . . . .	0,89	2,35
Спорадических металлов (700 км) . . . . .	0,36	1,42
Спорадических силикатов (700 км) . . . . .	0,20	0,82
Центрального ядра (3400 км) . . . . .	0,08	0,30
По А. П. Виноградову [1964]		
Земная кора, в среднем (1/3 гранитных пород и 2/3 базальтовых) . . . . .	1,5	6
Мантия . . . . .	0,015	0,038
По Дамону и Калпу [Damon, Kulp 1958]		
Земная кора (10% гранитов, 35% средних и 55% основных изверженных пород) . . . . .	1,3	5,0
Мантия (на основе данных по каменным метеоритам) . . . . .	0,04	0,13
По Турекьяну [Turckian, 1959]		
Вещество Земли в среднем по всем геосферам (на основе данных о каменных метеоритах) . . . . .	0,011	0,043

Необходимо отметить, что в определении характера вертикального распределения радиоактивных элементов остается еще много

неясного, основанного на дискуссионных предположениях, нуждающихся в уточнениях и подтверждениях.

Имеются также и некоторые противоречия. Так, представление о преимущественной распространенности радиоактивных элементов в гранитах приводит к логическому выводу, что тепловой поток в континентальных областях с мощными толщами гранитных пород должен быть выше, чем в океанических, подстилаемых преимущественно базальтами. Однако результаты выполненных измерений не подтвердили этого предположения. Тепловые потоки в континентальных и океанических областях оказались равными. Если это равенство не сможет быть подтверждено различиями в теплопроводностях пород или в механизме передачи тепла, то распределение и распространенность радиоактивных элементов не будет соответствовать современным представлениям о них [Верхуген, 1958].

### Образование гелия различными типами пород

Неравномерность распределения радиоактивных элементов в различных типах пород и в различных регионах обуславливает неодинаковые гелиеобразующие возможности отдельных петрографических и литологических разностей пород на различных участках их распространения. Естественно, что чем выше общая активность пород, тем выше образование ими гелия. Оценка величин удельного радиогенного образования гелия различными типами пород при кларковой радиоактивности дана в табл. 31.

Следует учитывать, что данные о содержании урана и тория в породах, приведенные в табл. 31, могут лишь весьма ориентировочно характеризовать среднее содержание в них радиоактивных элементов. Однако общее представление о радиогенной гелиепродуктивности каждого из типов пород все же может быть получено. Как видно из таблицы, наибольшая удельная гелиепродуктивность приходится на граниты (среди изверженных пород) и на глины (среди осадочных). Своеобразно, что удельная гелиепродуктивность названных пород характеризуется примерно одними и теми же цифрами —  $(15 \div 16) \cdot 10^{-17}$  г/год, что связано с одинаковой насыщенностью их радиоэлементами в весовом выражении.

Удельная генерация гелия, отнесенная к единицам объемов этих пород, будет, безусловно, различна и меньше для глин на величину, пропорциональную увеличению их пористости. Гелиепродуктивность карбонатов близка к гелиепродуктивности изверженных пород смешанного состава — базальтов и диоритов.

Аналогом осадочных пород в целом по гелиепродуктивности являются средние по составу изверженные породы.

Гелиепродуктивность галогенов ( $1,6 \cdot 10^{-17}$  г/год) значительно выше, чем ультраосновных изверженных пород ( $0,008 \cdot 10^{-17}$  г/год).

Фосфаты, черные морские сланцы и другие породы, обогащенные радиоактивными элементами, характеризуются обычно высокой удельной гелиепродуктивностью.

Удельное радиогенное образование гелия различными типами пород при их кларковой радиоактивности

Объект исследования (порода, вода)	Содержание, г/г		Удельное образование гелия одним граммом породы, $10^{-10}$ г/год		Источник сведений	
	U, $10^{-6}$	Th, $10^{-6}$	HeU	HeTh		He(U+Th)
<b>Изверженные породы</b>						
Кислые породы (граниты, липариты, риолиты и т.п.)	3,5	18	75,08	87,09	162,17	А. П. Виноградов [1962]
Породы смешанного состава (2 части кислого и 1 — основного)	2,5	13	53,63	62,90	116,53	То же
Средние породы (диориты, андезиты)	1,8	7	38,61	33,87	72,48	»
Основные породы (базальты, габбро, нориты, диабазы и т.д.)	0,5	3	40,73	14,51	25,24	А. П. Виноградов [1962]
Ультраосновные породы (дуниты, перидотиты, пироксениты)	0,003	0,005	0,06	0,02	0,08	То же
Кислые	4	13	85,80	62,90	148,70	Гудмен, Иванс (1941)
Средние	1,4	4,4	30,03	21,29	51,32	То же
Основные	1,1	4,0	23,60	19,35	42,95	»
Ультраосновные	0,6	2,0	12,87	9,68	22,55	»
<b>Осадочные породы</b>						
Глины	4,2	12,5	90,09	60,48	150,57	Средние данные из разных источников
Глинистые сланцы	3,0	10,0	64,35	48,38	113,23	То же
Сланцы черные морские	15	45	321,8	217,7	539,5	»
Аргиллиты	4	12	85,80	58,06	143,86	»
Песчаники	3,5	5,5	75,08	26,61	101,69	Средние данные из разных источников
Карбонаты	1,8	2,0	38,61	9,68	48,29	То же
Галогены и осадки выпаривания	0,5	1,0	10,73	4,84	15,57	»
Фосфаты	100	—	2145	—	—	»
Осадочные породы (глины и сланцы)	3,2	1,1	68,64	5,32	73,96	А. П. Виноградов [1962]

## Масштабы образования гелия в разных геосферах

Масштабы радиогенного образования гелия многократно подсчитывались при различных исследованиях, особенно в связи с изучением баланса гелия в атмосфере при решении вопросов о ее происхождении и возрасте. Все исследователи сходятся в одном мнении — почти весь земной гелий имеет радиогенное происхождение, и расходятся лишь в цифрах оценки его общего количества, что вполне естественно, если учесть на сколь большом числе дискуссионных предположений основан расчет баланса радиогенного гелия на Земле. Кук [Cook, 1957], принимая, что содержание урана и тория в литосфере составляют соответственно  $2 \cdot 10^{20}$  и  $5 \cdot 10^{20}$  г, рассчитал, что за год образуется  $3 \cdot 10^9$  г радиогенного гелия.

По данным Бирча [Maune, 1956], за  $10^9$  лет выделилось  $3,5 \times 10^{-3} \text{ см}^3$  гелия из 1 г гранитов и  $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$  из 1 г базальтов.

Майн [Maune, 1956], используя модель земной коры Шиллибера и Рассела, рассчитал, что скорость образования  $\text{He}^4$  в земной коре составляет  $95 \cdot 10^6$  атомов на  $1 \text{ см}^2$  для всей поверхности Земли. Причем  $4,5 \cdot 10^9$  лет тому назад скорость образования гелия была в 3,5 раза больше современной [Maune, 1957]. Удельная производительность гелия в расчетах, выполненных этим исследователем, принята равной  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$  из 1 г гранита за  $10^9$  лет.

Дамон [Damon, 1957], критикуя расчет Майна, отмечает, что последний зависил величину производительности гелия гранитами, которая, по его мнению, составляет всего  $0,995 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3 \text{ He}^4$  из 1 г гранита за  $10^9$  лет.

Содержание урана в гранитах принято им, так же как и Майном, равным  $4,2 \cdot 10^{-6} \%$ , при отношении  $\text{Th}/\text{U} = 3,5$ , хотя, по мнению Дамона, эта цифра также является завышенной и для континентальных пород среднего состава она не должна превышать  $2,1 \times 10^{-6} \%$ .

Николе [Nicolet, 1957], принимая концентрацию урана и тория, необходимую для образования теплоты в недрах равной, по Юри [Urry, 1955, 1956] соответственно  $1,2 \cdot 10^{-8}$  и  $3,8 \cdot 10^{-8}$  г/г, рассчитал, что общее количество этих элементов в земной коре и мантии составляет 9,65 г урана и 30,55 г тория на  $1 \text{ см}^2$  поверхности.

На основе этих цифр он подсчитал, что в 1 сек на каждый квадратный сантиметр земной поверхности образуется  $1,74 \cdot 10^6$   $\alpha$ -частиц. Масса коры и мантии при расчете принята равной  $4,1 \cdot 10^{27}$  г.

По определению Дамона и Калпа [Damon, Kulp, 1958] скорость образования радиогенного гелия в литосфере за год составляет  $191 \times 10^{30}$  атомов в земной коре и  $934 \cdot 10^{30}$  атомов в мантии.

В табл. 32 приведены результаты расчета скорости образования гелия, выполненного Дамоном и Калпом.

При общей скорости образования гелия земной корой и мантией  $1125 \cdot 10^{30}$  атомов в год, в соответствии с расчетами, выполненными Дамоном и Калпом, образуется примерно  $7,4 \cdot 10^9$  г  $\text{He}^4$  в год.

Многие исследователи с различными целями производили расчеты масштабов образования гелия. Нет необходимости приводить их здесь, отметим лишь в заключение один из наиболее обоснованных расчетов, выполненный А. П. Виноградовым в 1964 г.

Таблица 32  
Современная скорость образования He<sup>4</sup>,  
по Дамону и Каллу

Материнский изотоп	Скорость образования гелия (10 <sup>10</sup> атомов/год)		
	в коре	в мантии	суммарная
U <sup>235</sup>	4	21	25
U <sup>238</sup>	95	503	598
Th <sup>232</sup>	92	410	502
Сумма . .	191	934	1125

А. П. Виноградов при расчете масштабов радиогенного образования гелия принял вес земной коры равным  $3 \cdot 10^{25}$  г; граниты, составляющие по весу  $\frac{1}{3}$  земной коры, содержат (%): U —  $3,5 \times 10^{-4}$ , Th —  $18 \cdot 10^{-4}$ ; базальты, составляющие по весу  $\frac{2}{3}$  земной коры, содержат (%): U —  $5 \cdot 10^{-5}$ , Th —  $3,10^{-4}$ ; вес мантии —  $4 \times 10^{27}$  г, содержание (%): U —  $1,5 \cdot 10^{-6}$ , Th —  $3,8 \cdot 10^{-6}$ . В разное время по расчетам А. П. Виноградова были генерированы следующие количества гелия (табл. 33).

Всего, по А. П. Виноградову, за 4,5 млрд. лет земная кора и мантия образовали  $3,1 \cdot 10^{19}$  г He<sup>4</sup>. В год при современной скорости процесса образуется примерно  $4,55 \cdot 10^9$  г He<sup>4</sup>. Если сопоставить приведенные выше сведения о масштабах радиогенного образования гелия в одних единицах измерения, например He<sup>4</sup> г/год, то окажется, что все они равны между собой, хотя и не очень существенно, а именно: по данным Кука —  $3 \cdot 10^9$ ; по данным Майна —  $10,22 \times 10^9$ ; по данным Николе —  $1,57 \cdot 10^9$ ; по данным Дамона и Калпа —  $7,4 \cdot 10^9$ ; по данным А. П. Виноградова —  $4,55 \cdot 10^9$ .

Различия между крайними из приведенных значений —  $1,57 \times 10^9$  и  $10,22 \cdot 10^9$  г/год не существенны, если принять во внимание на сколь значительном числе дискуссионных предположений выполнены расчеты. Относительно хорошая сходимости результатов, полученная в расчетах масштабов радиогенного образования гелия, обусловлена главным образом тем, что константы, введенные в расчет различными авторами, мало отличались друг от друга и все отклонения в расчетах заключались лишь в разных величинах содержаний урана и тория гранитных и основных пород и их соотношениях в составе земной коры.

В табл. 34 приведен расчет радиогенного образования гелия различными геосферами, выполненный на основе сведений, приведенных в данной работе.

Таблица 33

Количества He<sup>4</sup>, образованные Землей (без учета ядра) при распаде урана и тория (10<sup>19</sup> г), по А. П. Виноградову

Время, млрд. лет назад	Радиоактивный изотоп			He <sup>4</sup>		
	в земной коре	в мантии	в Земле	в земной коре	в мантии	в Земле
Распад U <sup>235</sup>						
5	4,1409	5,5212	9,6622	0,4896	0,6527	1,1423
4,5	2,5495	3,3994	5,9489	0,2999	0,3999	0,6998
4	1,5604	2,0805	3,6409	0,1821	0,2428	0,4249
3	0,5941	0,7921	1,3862	0,0669	0,0893	0,1562
2	0,2247	0,2996	0,5243	0,0229	0,0306	0,0535
1	0,0850	0,1134	0,1984	0,0063	0,0084	0,0147
0	0,03227	0,0429	0,0751	—	—	—
Распад U <sup>238</sup>						
5	9,6497	12,8863	22,5160	0,6944	0,9258	1,6202
4,5	8,9338	11,9118	20,8456	0,6004	0,8006	1,4016
4	8,2722	11,0296	19,3018	0,5098	0,6797	1,1895
3	7,0917	9,4557	16,5475	0,3516	0,4688	0,8204
2	6,0795	8,1060	14,1855	0,2160	0,2879	0,5039
1	5,2115	6,9487	12,1602	0,0996	0,1329	0,2325
0	4,4678	5,9571	10,4249	—	—	—
Распад Th <sup>232</sup>						
5	30,82	19,52	50,33	0,7055	0,4469	1,1514
4,5	29,91	18,94	48,85	0,6114	0,3869	0,9983
4	29,31	18,57	47,88	0,5493	0,3486	0,8979
3	27,88	17,66	45,54	0,4014	0,2545	0,6559
2	26,52	16,80	43,32	0,2607	0,1655	0,4262
1	25,23	15,98	41,21	0,1272	0,0807	0,2079
0	24,00	15,20	39,20	—	—	—

Как показывают результаты вычислений, общее современное образование гелия всеми геосферами Земли составляет  $5,25 \cdot 10^9$  г/год, т. е. находится в тех же пределах, что и рассчитанное другими авторами. Доля самария в общем современном образовании гелия веществом Земли меньше 1%, т. е. достаточно мала, что позволяет не учитывать ее при ориентировочных вычислениях баланса гелия.

В земной коре в настоящее время образуется примерно 50,2% всего радиогенного гелия, в мантии — 36,6%, тогда как в ядре — 13,2%.

Нет оснований утверждать, что современное радиогенное образование гелия составляет именно  $5 \cdot 10^9$  г/год, а не  $10 \cdot 10^9$  г/год, как было подсчитано Майном, так как параметры, положенные в основу расчетов, особенно по отдельным геосферам Земли, ориентировочны, но порядок указанных цифр образования гелия, по-видимому,



Таблица 34

## Современное радиогенное образование гелия различными геосферами Земли

Элементы расчета	Константа, содержание	Источник сведений
Количество гелия, образуемое 1 г радиоактивного элемента:		
по урану, г/год	214,5038·10 <sup>-13</sup>	Табл. 28
по торию, г/год	48,3828·10 <sup>-13</sup>	То же
по самарию, г/год	0,2257·10 <sup>-13</sup>	»
Ядро Земли		
Мощность, км	3471	Mason (1954)
Объем, см <sup>3</sup>	0,175·10 <sup>27</sup>	То же
Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	10,7	»
Масса, г	1,876·10 <sup>27</sup>	»
Содержание в 1 г породы:		
урана, г	0,07·10 <sup>-7</sup>	Brown [1949]
тория, г	0,4·10 <sup>-7</sup>	То же
самария, г	11,0·10 <sup>-7</sup>	Urey [1952]
Количество гелия, образуемое 1 г породы в год:		
по урану, г	15,0153·10 <sup>-20</sup>	Расчетная величина
по торию, г	19,3531·10 <sup>-20</sup>	То же
по самарию, г	2,4827·10 <sup>-20</sup>	»
суммарно по (U+Th+Sm), г	36,8511·10 <sup>-20</sup>	»
Общее образование гелия всей массой ядра, г/год	69,1327·10 <sup>7</sup>	»
Мантия Земли		
Мощность, км	2870	Mason (1954)
Объем, см <sup>3</sup>	0,892·10 <sup>27</sup>	То же
Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	4,5	»
Масса, г	4,056·10 <sup>27</sup>	»
Содержание в 1 г породы:		
урана, г	1,1·10 <sup>-8</sup>	Turekian [1959]
тория, г	4,3·10 <sup>-8</sup>	То же
самария, г	13,0·10 <sup>-8</sup>	Brown [1949]
Количество гелия, образуемое 1 г породы в год:		
по урану, г	23,5954·10 <sup>-20</sup>	Расчетная величина
по торию, г	20,8046·10 <sup>-20</sup>	То же
по самарию, г	2,9341·10 <sup>-20</sup>	»
суммарно по (U+Th+Sm), г	47,3341·10 <sup>-20</sup>	»
Общее образование гелия всей мантией, г/год	191,9871·10 <sup>7</sup>	»
Земная кора		
Мощность, км	30	Mason (1954)
Объем, см <sup>3</sup>	0,015·10 <sup>27</sup>	То же
Средняя плотность, г/см <sup>3</sup>	2,8	Mason (1954)
Масса, г	0,043·10 <sup>27</sup>	То же

Продолжение табл. 34

Элементы расчета	Константа, содержание	Источник сведений
Содержание в 1 г породы:		
урана, г	1,5·10 <sup>-6</sup>	A. П. Виноградов [1964]
тория, г	6,0·10 <sup>-6</sup>	То же
самария, г	6,5·10 <sup>-6</sup>	Гольдшмидт, Ранкама (1953)
Количество гелия, образуемое 1 г породы в год:		
по урану, г	32,1756·10 <sup>-18</sup>	Расчетная величина
по торию, г	29,0297·10 <sup>-18</sup>	То же
по самарию, г	0,1487·10 <sup>-18</sup>	»
суммарно (U+Th+Sm), г	61,3520·10 <sup>-18</sup>	»
Общее образование гелия всей массой земной коры, г/год	263,8136·10 <sup>7</sup>	»
Суммарное современное радиогенное образование гелия всей массой земли, г/год	524,9334·10 <sup>7</sup>	»
Суммарное современное радиогенное образование гелия всей массой земли, см <sup>3</sup> /год	293,9627·10 <sup>11</sup>	»

Примечание. Содержание урана и тория для ядра принято по данным о содержании этих элементов в железных метеоритах. Содержание самария в ядре, а также урана, тория и самария в мантии — по данным о содержании этих элементов в хондритах.

сохранится, так как главные параметры расчетов не будут значительно изменяться при дальнейших исследованиях. Такими главными параметрами мы считаем три из них: 1) массу Земли, определенную астрономическими методами достаточно точно; 2) постоянные радиоактивного распада, последующее уточнение которых не изменяет существенно их величины; 3) общее количество основных  $\alpha$ -излучающих радиоактивных элементов на Земле — урана и тория. Распределение этих элементов по геосферам Земли — вопрос дискуссионный, но представление об их общем количестве на Земле, видимо, достаточно близко к действительному. Так как баланс радиоактивных элементов тесно связан с тепловым балансом Земли, то любое резкое увеличение или уменьшение количества радиоактивных элементов в Земле приведет либо к избытку расчетного внутреннего тепла Земли сравнительно с действительным, либо к его дефициту, т. е. современный тепловой баланс Земли контролирует общее количество радиоактивных элементов в Земле.

Небезынтересно отметить, что годовая генерация гелия всей Землей, равная 5249 т, или 29,4 млн. м<sup>3</sup>, значительно меньше годовой добычи гелия только в США, составляющей около 100 млн. м<sup>3</sup> в год.

Как уже отмечалось выше, древняя Земля содержала значительно больше тяжелых радиоактивных элементов, чем современная, другим было также и соотношение между отдельными их изотопами. Естественно, что и масштабы радиогенного гелиеобразования древней Землей были значительно выше, чем современной. Расчет масштабов генерации гелия за разное время, выполненный А. П. Виноградовым [1964], был приведен нами в табл. 33.

При решении вопросов о генезисе отдельных месторождений гелиеносных газов особый интерес представляет вопрос о масштабах радиогенного образования гелия в осадочной толще, ее роли в формировании гелиевых месторождений.

В связи с этим рассмотрим масштабы генерации гелия в осадочной толще. Осадочные породы составляют примерно 5% общего объема литосферы. Они имеют различную мощность — от нуля в районах выхода кристаллических щитов на поверхность до 30—50 км в горных областях.

Наиболее распространенными среди осадочных пород являются глинистые, песчаные и карбонатные с соотношением между ними 5:3:2 [Рухин, 1961]. Общий объем осадочных пород, по Кларку, —  $3,7 \cdot 10^8 \text{ км}^3$ , по Кюнелю, —  $13 \cdot 10^8 \text{ км}^3$ , причем  $8 \times 10^8 \text{ км}^3$  из них произошло за счет выветривания кристаллических пород, а остальное — за счет переработки более древних осадочных пород [Рухин, 1961].

На основе данных Кларка можно подсчитать, что на долю глинистых пород приходится  $1,85 \cdot 10^8 \text{ км}^3$ , песчаных —  $1,11 \cdot 10^8 \text{ км}^3$  и карбонатных —  $0,74 \cdot 10^8 \text{ км}^3$ . Используя эти данные, а также данные о содержании радиоактивных элементов в различных типах пород и генерации ими гелия, можно подсчитать общее количество гелия, образующегося в единицу времени, как в целом по осадочным породам, так и по отдельным их типам. Результаты расчетов приведены в табл. 35.

Как видно из таблицы, масштабы удельной генерации гелия осадочной толщей, равные примерно  $2,7 \cdot 10^{-17} \text{ г/г He}$  в год, превышают масштабы среднего удельного генерирования гелия земной корой ( $6,1 \cdot 10^{-17} \text{ г/г}$ ) и равны примерно удельной генерации ее верхнего гранитного слоя. Однако общие масштабы генерации гелия в осадочных отложениях несопоставимо малы сравнительно с масштабами генерации гелия в породах земной коры в связи с высокой пористостью седиментационных отложений и с их более молодым возрастом.

Если пренебречь процессами диффузии и потерями гелия из пород и предположить, что соотношения между отдельными типами пород в отложениях палеозоя и мезозоя те же, что и принятые Л. Б. Рухиным [1961] для осадочной толщи в целом, то, учитывая параметры, приведенные в табл. 35, можно рассчитать, что количество гелия, образуемое 1 г породы нижнемелового возраста, может составить всего лишь  $3,24 \cdot 10^{-13} \text{ г}$  за все время существования породы, исчисленное 120 млн. лет, 1 г породы каменноугольного возраста (300 млн.

Таблица 35  
Современное радиогенное образование гелия осадочными породами

Тип породы	Объем пород, $10^{13} \text{ см}^3$	Средняя плотность, $\text{г/см}^3$	Масса пород, $10^{13} \text{ г}$	Содержание, $\text{г/г}$		Удельное гелиеобразование 1 г породы в год			Общее гелиеобразование за все время существования пород, $10^7 \text{ г/год}$
				U, $10^{-6}$	Th, $10^{-6}$	по U, $10^{-17}$	по Th, $10^{-17}$	по $\sum U, Th, 10^{-17}$	
Глинистые . . . . .	1,85 (1)	1,8 (3)	3,33	3,7 (4)	12,0 (4)	7,94	5,51	13,75	4,54
Песчаные . . . . .	1,11 (1)	1,9 (3)	2,11	3,5 (5)	5,5 (5)	7,51	2,66	10,17	2,16
Карбонатные . . . . .	0,74 (1)	2,3 (3)	1,70	2,2 (4)	1,7 (4)	4,72	0,82	5,54	0,94
Всего . . . . .	3,70	1,93	7,14						7,64
Образовавшиеся за счет выветривания кристаллических пород . . . . .	8 (2)	2,0 (3)	16	3,6 (5)	12,5 (5)	7,72	5,56	13,28	21,25
Образовавшиеся за счет переработки древних осадочных пород . . . . .	5 (2)	1,8 (3)	9	3,2 (6)	9,9 (6)	6,86	4,79	11,65	10,48
Всего . . . . .	13	1,92	25						31,73

Примечание. В скобках обозначены ссылки на источник сведений: 1 — по Кларку [Рухин, 1961]; 2 — по Кюнелю [Рухин, 1961]; 3 — по Л. Б. Рухину [1961] с дополнениями; 4 — по Адамсу и др. [(1959)]; 5 — по материалам табл. 51; 6 — по Эрикссону [1964].

лет) —  $8,1 \cdot 10^{-12}$  г гелия, тогда как 1 г образца гранита земной коры возрастом в 3,0 млрд. лет создает за время своего существования около  $5 \cdot 10^{-7}$  г гелия.

## § 2. МАСШТАБЫ НАКОПЛЕНИЯ НА ЗЕМЛЕ ГЕЛИЯ, НЕ СВЯЗАННОГО С ПРОЦЕССАМИ АЛЬФА-РАСПАДА

Альфа-распад ядер тяжелых радиоактивных элементов обеспечивает генерацию основных объемов гелия на Земле, все иные источники поступления гелия, отмеченные выше, имеют больше теоретическое, чем практическое значение.

Космические лучи, пронизывающие межпланетное пространство, обрушивают на Землю поток заряженных частиц большой энергии, несущийся со скоростью, близкой к световой. Основную долю в потоке космического излучения составляют протоны — ядра водорода. Присутствуют также ядра гелия, углерода, кислорода, кремния, железа и др. (табл. 36).

Таблица 36

Относительное содержание ядер в первичных космических лучах и в природе [Гинзбург, Фрадкин, 1964]

Ядра	В первичных космических лучах на $10^8$ протонов	В среднем в природе на $10^8$ атомов водорода
Протоны . . . . .	100 000	100 000
$\alpha$ -частицы . . . . .	7 000	7 700
Группа L (Li, Be, B, $z=3-5$ ) . . . . .	200	$3,6 \cdot 10^{-4}$
Группа M (C, N, O, F, $z=6-9$ ) . . . . .	500	80
Группа H ( $z \geq 10$ ) . . . . .	200	30
Железо ( $z=26$ ) . . . . .	30	1,5
Все ядра с $z > 30$ . . . . .	1	$10^{-3}$

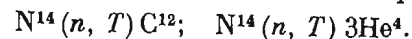
Интенсивность их потока практически постоянна во времени и составляет за пределами атмосферы всего лишь около 10 частиц на  $1 \text{ см}^2/\text{мин}$ . Небольшие вариации (колебания) интенсивности, не превышающие доли процента, и лишь изредка более значительные обусловлены чаще всего процессами, происходящими на Солнце.

При средней плотности первичного излучения 10 частиц на  $1 \text{ см}^2/\text{мин}$  на единицу поверхности Земли поступает ежеминутно около 0,7 ядер тяжелого изотопа гелия. По мере прохождения через атмосферу ядра гелия сталкиваются с атомами среды и постепенно, теряя энергию, в конечном итоге замедляются и, присоединяя к себе электроны, превращаются в атомы  $\text{He}^4$ . Таким образом, вместе с частицами космического излучения в атмосферу Земли ежеминутно поступает 0,7 атома  $\text{He}^4$  на  $1 \text{ см}^2$  ее поверхности.

Принимая во внимание изотропность космических лучей в мировом пространстве (т. е. равномерную интенсивность во всех направ-

влениях), можно подсчитать, что на земную поверхность площадью около  $5,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$  ежеминутно из космоса поступает  $3,56 \cdot 10^{18}$  атомов  $\text{He}^4$ , или  $1,9 \cdot 10^{24}$  атомов  $\text{He}^4$  в год. Основная доля частиц в первичных космических лучах имеет энергию  $10^9-10^{10} \text{ эв}$ , некоторые из них —  $10^{15}-10^{19} \text{ эв}$ . Внедряясь со столь высокой энергией в атмосферу, космические частицы сталкиваются с веществом среды, способствуя возникновению новых элементарных частиц, в результате чего общее число частиц и, следовательно, интенсивность космических лучей сильно возрастает (ливни). Это увеличение интенсивности космических частиц за счет вторичного излучения начинается на высотах примерно 25—30 км. Частицы первичного излучения могут выбивать из атомных ядер среды не только протоны, но и  $\alpha$ -частицы, дейтерий и т. д., несколько увеличивая поток ядер гелия в атмосфере.

По Либби, при бомбардировке атомов азота  $\text{N}^{14}$  нейтронами космических лучей образуются  $\text{C}^{12}$ ,  $\text{He}^4$  и T по реакциям



Образующийся при нейтронной реакции тритий (T), являющийся сверхтяжелым радиоактивным изотопом водорода, испуская электроны, переходит в устойчивый легкий изотоп гелия  $\text{He}^3$  с периодом полураспада 12,46 лет. Тритий образуется также и из дейтерия при захвате последним нейтронов  $\text{H}^2(n, \gamma)T$ .

Таким образом, под воздействием вторичного космического излучения в атмосфере дополнительно образуется  $\text{He}^4$  и тритий, распадающийся в  $\text{He}^3$ . Принимая во внимание, что интенсивность заряженных частиц космических лучей в результате столкновения с атомами атмосферы примерно удваивается, можно сугубо ориентировочно предположить, что в атмосфере в результате столкновений образуется дополнительно еще 0,1  $\alpha$ -частица на  $1 \text{ см}^2/\text{мин}$ , т. е.  $2,7 \cdot 10^{23}$  атомов  $\text{He}^4$  в год.

Масштабы образования трития, а вместе с ним через короткий промежуток времени и  $\text{He}^3$  в результате нейтронных реакций с  $\text{N}^{14}$  не превышают 0,1—0,3 атома в 1 сек на  $1 \text{ см}^2$  земной поверхности (Фиреман, Рейланд, 1955).

Скорость образования  $\text{He}^3$  в результате нейтронных реакций с  $\text{N}^{14}$ , а также из космических лучей, составляющих примерно одинаковое количество  $\text{He}^3$  и T, составляет по расчетам Фиремана [Fierman, 1953]: при нейтронных реакциях с  $\text{N}^{14}$  —  $0,1 \text{ атома}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$ , из космических лучей —  $0,5 T + 0,5 \text{ He}^3$ , т. е. всего  $0,1 + 2 \cdot 0,5 = 1,1$  атома  $\text{He}^3$  на  $1 \text{ см}^2/\text{сек}$ , или  $17,6 \cdot 10^{25}$  атомов  $\text{He}^3$  в год на всю земную поверхность (с учетом полного распада трития). Однако последующие расчеты и измерения показали, что в водах океанов содержится значительно больше трития, чем это было принято\*.

Бегеман, Либби, Крайг, Джилетти и другие исследователи (1956—1957) установили, что масштабы образования трития

\* В воды океана тритий поступает с дождем в виде сверхтяжелой воды, образующейся при его соединении с кислородом воздуха.

составляют около 0,5—1,2 атома в секунду на  $1 \text{ см}^2$  поверхности Земли. Несоответствие между скоростью образования трития по данным экспериментов с реакциями частиц и тритиевым балансом гидросферы позволило Крайгу (1957) предположить солнечное происхождение трития. На основе данных величины отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$  на Солнце, равного 0,02 (Greenstein, 1951), Дамон и Калп [Damon, Kulp, 1958] предположили, что даже если весь поток первичных космических лучей идет от Солнца, то это составит всего лишь 0,002 атома  $\text{H}^3$  на  $1 \text{ см}^2/\text{сек}$ , т. е. в 100 раз меньше, чем требуется для объяснения избытка трития.

Расчет скорости образования  $\text{He}^3$  в атмосфере, выполненный этими же авторами, показал, что ежесекундно в атмосфере образуется 1,9 атома  $\text{He}^3$  на  $1 \text{ см}^2$ , что составляет  $3,1 \cdot 10^{26}$  атомов  $\text{He}^3$  в год на всю земную поверхность.

Сопоставление приведенных выше цифр генерации  $\text{He}^4$  в атмосфере за счет космического излучения  $(1,9 + 0,27) \cdot 10^{24}$  атомов в год на всю земную поверхность и генерации  $\text{He}^3$  за счет распада трития и ядерных реакций с космическими лучами —  $3,1 \cdot 10^{24}$  атомов в год — показывает, что скорость образования  $\text{He}^3$  в атмосфере примерно в 100 раз превышает скорость образования  $\text{He}^4$ . Естественно, что поступление обоих изотопов гелия из литосферы при этом не учитывается.

Тритий, а вместе с ним  $\text{He}^3$  образуются не только в атмосфере, но также и в литосфере при нейтронном облучении лития (реакция Хилла) —  $\text{Li}^6(n, \alpha) \text{T}$ .

Литий присутствует в гранитах в количестве 0,09 атомов на 100 атомов кремния. Источниками нейтронов в недрах являются процессы спонтанного расщепления атомов урана, бомбардировка бериллия  $\alpha$ -лучами при радиоактивном распаде и проникающие космические лучи. Свидетельством создания литиевыми минералами трития являются окклюдированные сподуменами газы с повышенным содержанием легкого изотопа гелия.

Теоретические расчеты и экспериментальные исследования, выполненные Моррисоном и Пайном [Morrison, Pine, 1955], показали, что число атомов  $\text{He}^3$ , образующихся на 1 атом  $\text{He}^4$  при облучении лития в типичных гранитах, составляет  $\frac{\text{He}^3}{\text{He}^4} = (1 \pm 0,5) \cdot 10^{-7}$ . Примерно эту же величину отношения  $\frac{\text{He}^3}{\text{He}^4}$  дают и природные газы осадочной толщи, что, однако, примерно в 10 раз ниже соотношения изотопов гелия в атмосферном воздухе —  $\frac{\text{He}^3}{\text{He}^4} = (1,2 \div 1,3) \cdot 10^{-6}$ .

По данным Кука (Cook, 1961), скорость образования  $\text{He}^3$  в коре и мантии составляет, вероятно, лишь 0,002% от скорости образования  $\text{He}^4$ .

Общее количество  $\text{He}^4$ , образующееся при  $\alpha$ -распаде, составляет  $2,94 \cdot 10^{13} \text{ см}^3$  в год (табл. 42), следовательно, ежегодно при нейтронном облучении Li в недрах генерируется примерно  $58,8 \cdot 10^7 \text{ см}^3 \text{ He}^3$ .

Гелий поступает на Землю также и вместе с межпланетной пылью, метеоритами и прочими космическими телами. Все космические тела содержат гелий в тех или иных количествах, причем в отличие от земных источников содержание легкого изотопа гелия в метеоритах составляет около 30%.

Основное количество  $\text{He}^3$  образуется в метеоритах в результате космической радиации.

На основе этих данных Майн [Maune, 1956] предположил, что существенное обогащение легким изотопом  $\text{He}^3$  атмосферного гелия объясняется поступлением его вместе с метеоритной материей в атмосферу Земли. При этом он принял, что ежедневно Земля собирает примерно 5 000 т метеоритной пыли, содержащей  $\text{He}^3 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3/\text{г}$ , что составит в сумме  $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^3 \text{ He}^3$  в сутки на всю поверхность Земли, или примерно  $3,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^3 \text{ He}^3$  на  $1 \text{ см}^2 \cdot \text{сек}$  ( $\approx 9,2$  атома  $\text{He}^3$ ). На основе принятой Майном оценки поступления  $\text{He}^3$  с метеоритной пылью, а также величины отношения  $\text{He}^3/\text{He}^4$ , принятого для метеоритов равным примерно 0,2, можно рассчитать, что одновременно с  $\text{He}^3$  вместе с метеоритной пылью поступает на Землю примерно в 4 раза больше тяжелого изотопа гелия —  $\text{He}^4$ .

Принятый Майном объем накопления гелия за счет метеоритной пыли был подвергнут Дамоном [Damon, 1957] критике, однако Майн, соглашаясь с дискуссионностью представлений о масштабах поступления пыли в атмосферу Земли, содержания в ней гелия и ошибочностью некоторых принятых параметров, отметил, что рассчитанная им другая цифра выпадения на Землю метеоритной пыли — 2 000 т/сутки — может оказаться излишне заниженной и что вполне приемлемо согласиться с ранее рассчитанным им значением — 5000 т/сутки.

Оценки общего количества внеземного вещества, выпадающего на Землю, при современной степени изученности пока не могут считаться достоверными [Флоренский, 1963]. Небезынтересно отметить, что в соответствии с данными И. С. Астаповича [1958] общее количество метеорной материи, осаждающейся на Землю за сутки, составляет более 16 т/год ( $10^{-6} \text{ г/сек} \cdot \text{см}^2$ ). В зависимости от принятых методов расчета могут быть и иные результаты.

Недостаточно достоверны также и данные о содержании гелия в метеоритных объектах, поэтому оценка масштабов поступления гелия на Землю вместе с космической материей — проблематична, но учитываться в общем гелиевом балансе Земли он, безусловно, должен.

Подводя итоги вышесказанному, можно подсчитать, что ежесекундно в результате космического излучения, нейтронных расщеплений и распада трития в атмосферу поступает примерно  $0,12 \cdot 10^{-2}$  атома  $\text{He}^4$  и 1,9 атома  $\text{He}^3$  на  $1 \text{ см}^2$ , что составляет соответственно  $7,2 \cdot 10^8$  и  $11,3 \cdot 10^8 \text{ см}^3/\text{год}$ .

Вместе с метеоритной пылью на Землю поступает примерно 9,2 атома  $\text{He}^3$  и 36,7 атома  $\text{He}^4$  на  $1 \text{ см}^2 \cdot \text{сек}$ , или соответственно  $5,5 \cdot 10^7$  и  $21,9 \cdot 10^7 \text{ см}^3/\text{год}$ . Частично метеоритный гелий поступает в атмосферу в результате дегазации космических частиц, частично

он вместе с ними осаждается в седиментационной толще, но постепенно в результате диффузии переходит в конечном итоге в атмосферу.

В литосфере в результате распада трития, возникающего при нейтронных реакциях с литием, образуется примерно 0,002%  $\text{He}^3$  от общего количества радиогенного гелия ( $\text{He}^4$ ), накапливающегося при  $\alpha$ -распаде, или  $58,8 \cdot 10^7 \text{ см}^3/\text{год}$ . Если сопоставить масштабы гелиенакопления при  $\alpha$ -распаде —  $2,94 \cdot 10^{13} \text{ см}^3/\text{год}$  со всеми прочими источниками, то на долю последних придется всего 0,003% от общего количества гелия, генерируемого на Земле.

### § 3. МИГРАЦИЯ ГЕЛИЯ В НЕДРАХ И ЕГО ДИССИПАЦИЯ

Подавляющее большинство минералов земной коры не удерживает образующийся в них при  $\alpha$ -распаде гелий в связи с его высокими диффузионными свойствами. Высвобождаясь из гелеобразующих минералов, он мигрирует в недрах Земли в сторону меньшего потенциала, т. е. в конечном итоге в атмосферу, но и в атмосфере он не удерживается длительное время. Легкий и подвижный атом гелия без особых затрат энергии преодолевает гравитационное поле Земли и диссипирует, т. е. ускользает в космос. Такова общая схема миграции гелия на Земле. Рассмотрим ее в деталях.

#### Механизм потери радиогенного гелия горными породами и минералами

Исследования процессов выделения гелия из минералов и горных пород выполнялись главным образом при определении их абсолютного возраста с помощью гелиевого метода. Много внимания этим вопросам уделили в своих работах Стрэтт [Strutt, 1908], Брод (1908), Панет [1928, 1929], Урри [Urry, 1932, 1933], А. А. Черепеников [1933], В. Г. Хлопин [1936] и многие другие. Однако наиболее глубокие и всесторонние исследования в этом направлении принадлежат советскому исследователю Э. К. Герлингу [1935—1957].

Основанием для проведения исследований по изучению выделения гелия из минералов послужил тот факт, что отдельные минералы теряют почти весь образовавшийся в них гелий, несмотря на хорошую сохранность минерала, тогда как другие почти полностью его удерживают, причем даже при неблагоприятных условиях. В результате проведенных экспериментов было выявлено, что основными факторами, определяющими условия сохранности гелия в минералах, являются главным образом характер структурных и химических связей в кристаллической решетке генерирующих гелий минералов, форма нахождения гелия в структуре решетки, а также интенсивность и направление действия различных вторичных физических, химических и механических воздействий на состояние решетки минерала.

Форма нахождения и механизм перемещения гелия в решетках кристаллов. Исследования, выполненные Э. К. Герлингом [1957a], показали, что формы нахождения гелия в минерале весьма разнообразны — от свободного до прочно связанного — и что выделение его происходит стадийно в соответствии с энергией связи его с решеткой и интенсивностью воздействия на минерал с целью извлечения из него гелия. Так, в одном из кристаллов монацита удалось установить пять различных положений атомов гелия с весьма неодинаковой прочностью связи его с решеткой.

В значительной мере на положение атомов гелия в решетке минерала влияет форма нахождения в нем радиоактивных элементов, генерирующих гелий. Локализация радиоактивных элементов в различных минералах весьма разнообразна. Они могут находиться внутри кристаллических решеток как в качестве основного элемента минерала, так и в виде микропримесей, могут находиться во внешних их зонах, могут концентрироваться по малейшим трещинам и нарушениям внутри минералов и т. д. в зависимости от типов химических соединений радиоактивных элементов и генезиса содержащих их минералов. В соответствии с локализацией радиоактивных элементов локализуется и гелий, так как свободный пробег  $\alpha$ -частиц от источника их генерации не превышает в твердых телах 45 мк.

Гелий может присутствовать в минералах как в свободном состоянии, окклюдированным в разного рода мельчайших порах, пустотах, трещинах, капиллярах и т. п., свойственных большей части минералов, так и в адсорбированном состоянии, как слабо — на поверхностях различных свободных полостей минералов, так и более жестко — по плоскостям спайностей. Внутри кристаллических решеток гелий может занимать как регулярное место в решетке минерала при замещении им выбитого под действием радиации атома, так и иррегулярное положение в межкристаллическом пространстве. Он может занимать также и свободное место в решетке минералов (дырки, вакансии и т. п.).

Способность к перемещению гелия, находящегося в свободном или слабо адсорбированном состоянии, не вызывает сомнений. Крайне легкий и незначительный по размеру атом гелия свободно мигрирует по мельчайшим трещинам и капиллярным системам в кристаллах в сторону меньших градиентов.

Менее ясен вопрос о механизме перемещения гелия, находящегося внутри минералов с устойчивой кристаллической решеткой. Атом может двигаться внутри решетки кристалла только при наличии некоторого избытка энергии ( $E$ ), называемого энергией активации. Источником активации служат особенно благоприятные столкновения, доля которых определяется законом распределения Больцмана и растет с температурой.

Исследование механизма перемещения гелия в решетке кристаллов, выполненное Э. К. Герлингом [1957a, 1957b] при изучении теплоты диффузии гелия, позволило ему прийти к выводу, что перемещение гелия в кристаллах происходит по межкристаллическому

пространству. Основано это заключение на том, что перемещение атомов по вакансиям в силикатах, обладающих очень малой электропроводностью, связано с весьма высоким значением энергии активации. Поэтому уход гелия из таких минералов при диффузии за счет перемещения вакансий маловероятен, тогда как на самом деле большинство силикатных пород и минералов легко теряют гелий. Следовательно, гелий диффундирует по междоузлиям кристаллическим пространствам, причем диффундирующий атом передвигается скачками из одной элементарной ячейки в другую.

По-видимому, нет оснований исключать и другой вид диффузии гелия в кристалле — диффузии по вакансиям, посредством миграции по дефектам в кристаллах. Это явление, бесспорно, имеет место в зоне действия радиационных эффектов в минералах при  $\alpha$ -излучающем радиоактивном распаде. Энергия ионизации, сопровождающая  $\alpha$ -распад на таких участках, вполне достаточна для обеспечения не только перемещения иона или атома гелия на вакантные места решетки, но и для замещения атома, находящегося в узле решетки, на атом внедрения. Совершенно не исключается, что этот же вид диффузии гелия имеет место и вне зон радиации в целом ряде структурных типов кристаллов, изобилующих вакансиями в решетках. Следовательно, вероятнее всего, что перемещение гелия в кристаллических решетках минералов с устойчивой структурой происходит как по междоузлиям кристаллическим пространствам, так и по вакансиям в решетках кристаллов. В минералах с неустойчивой или рыхлой структурой, изобилующих многочисленными нарушениями как первичного, так и вторичного характера, происходит свободная миграция гелия по всем междоузлиям кристаллическим пространствам.

Влияние различных факторов на масштабы потери гелия минералами и породами. Проведенное Стреттом [Strutt, 1903, 1910] широкое исследование возраста минералов по накопившемуся в них гелию, основанное на очень большом числе определений, показало, что полученные возрастные значения составляли чаще всего одну треть, реже половину от значений, полученных по свинцовому методу. И лишь для единичных минералов потеря гелия составляла 30% и менее. Выявление таких значительных масштабов потерь гелия самыми разнообразными минералами резко ограничило применимость гелиевого метода для определения абсолютного возраста минералов и пород, но одновременно с этим послужило толчком для проведения исследований по изучению механизма улетучивания гелия из минералов, а также факторов, благоприятствующих его сохранности, с целью выявления минералов, пригодных для определения возраста гелиевым методом.

Дебай и Холмс [Dubey, Holmes, 1929] предположили, что потеря гелия генерирующими породами обусловлена его избыточными концентрациями, создающимися в минералах по мере накопления гелия при  $\alpha$ -распаде. Действительно, если атом, испытывающий радиоактивный распад с излучением  $\alpha$ -частицы, находится внутри кристаллической решетки, то даже при максимально возможном

пробега  $\alpha$ -частицы под действием ядерных сил, измеряемом величиной около 40 мк, образующийся гелий будет оставаться в кристалле, так как размеры даже мельчайших структурных единиц минералов обычно превышают эту величину. Количество гелия в древнем сильно радиоактивном минерале, по данным Ранкама [1956], может превышать  $30 \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1}$ , при этом внутреннее давление гелия на минерал может достигать 50 ат, а по данным Вуда [Харлей, 1956] — до 100—200 ат, что действует на минерал разрушающе и вместе с другими дополнительными факторами способствует нарушению кристаллической структуры минерала и содействует потере гелия.

Урри [Urri, 1936], исследуя возраст основных эффузивных пород, содержащих незначительные количества радиоактивных элементов и гелия и, следовательно, мало нарушенных радиационными воздействиями, получил хорошую сходимость возрастных данных по гелиевому и свинцовому методам для большинства образцов, и лишь отдельные из них дали значительные отклонения. Это позволило Урри сделать вывод, что основные породы хорошо удерживают образующийся в них в небольших количествах гелий и пригодны для возрастных определений, и только метаморфизм или нагревание этих пород может способствовать значительным потерям гелия из них.

Однако определения возраста минералов и пород Хибинского массива, выполненные Э. К. Герлингом в 1936 г., показали, что потеря гелия минералами происходит даже в обычных температурных условиях, вне зоны действия термального метаморфизма. И при этом особенно характерным оказался факт, что различные минералы в одной и той же части породы несут неодинаковые потери гелия, несмотря на то, что геологические условия их существования были одними и теми же. Это наблюдение позволило Э. К. Герлингу сделать вывод, что существенная роль в потере гелия из минералов принадлежит структуре минералов — плотности упаковки решетки кристаллов и энергии внутренней связи между элементами решетки. Последующими исследованиями было выявлено, что улетучиваемость гелия зависит от многих факторов, определяемых прежде всего состоянием кристаллической решетки генерирующего гелий минерала и физико-химическими условиями его существования.

Основными из них являются следующие: 1) характер локализации образующих гелий радиоактивных элементов в структуре минералов; 2) структура кристаллической решетки генерирующего гелий минерала, плотность упаковки его кристаллической решетки и характерная для нее теплота диффузии; 3) наличие вторичных изменений в структуре кристаллов, возникающих под действием различных факторов — радиации, процессов химических реакций, явлений перекристаллизации, полиморфных превращений, а также под действием процессов выветривания и метаморфических изменений, охватывающих крупные массивы пород в целом.

Выветрелые, метаморфизованные, измененные и перекристаллизованные породы, состоящие из породообразующих минералов

с крупной и рыхлой кристаллической решеткой, как правило, теряют почти весь образовавшийся в них гелий.

Рассмотрим отдельные факторы, влияющие на сохранность гелия в минералах, с тем, чтобы оценить их роль и значение в общем процессе потери гелия породами.

Влияние характера локализации образующих гелий радиоактивных элементов в решетке минералов. Харлей и Пичотто (1950), изучая возраст минералов по гелиевому методу, пришли к выводу, что наблюдаемые аномалии в определениях зависят в значительной мере от характера распределения радиоактивных элементов в изверженных породах. Подавляющая часть урана и тория изверженных пород, примерно  $\frac{2}{3}$  их общего количества, содержится в мелких зернах таких минералов, как циркон и монацит. Размеры их не превышают обычно нескольких десятков микрон, реже — выше. Доля этих минералов в общем объеме изверженных пород не превышает 1%. Торий и уран входят в их кристаллические решетки изоморфно, т. е. занимают регулярное положение внутри решетки минералов, замещая в отдельных междоузлиях цирконий или цезий.

Такое равномерное распределение радиоизотопов является наиболее благоприятным с точки зрения сохранности образующегося гелия. Генерируемый гелий, внедренный в кристаллическую решетку этих минералов, прочно ими удерживается. Исследования, выполненные Харлеем [1956], показали, что в цирконах с низкой активностью сохраняется почти весь образовавшийся в них гелий. Однако свойственная обычно этим минералам обогащенность радиоактивными элементами приводит к радиационным повреждениям кристаллов, способствуя значительной потере ими гелия (см. ниже).

В минералах, в которых радиоизотопы не могут замещать основных атомов, составляющих их структуры, например, в кварце, в полевых шпатах, радиоактивные элементы находятся в составе примесей, а также располагаются на поверхности изломов. При высокой примесной активности кристаллы, генерирующие гелий, теряют его в связи с радиационными повреждениями, при низкой — нередко хорошо сохраняют его.

Изучение радиоактивности основных пород свидетельствует о том, что для них характерно однородное распределение радиоизотопов. Микроскопия шлифов норита и анортозита, выполненная Пичотто, показала, что сильно радиоактивные включения в них отсутствуют, и лишь вдоль трещин была отмечена слабая активность. По-видимому, радиоизотопы присутствуют в таких минералах, как структурные составляющие их кристаллические решетки, следовательно, образующийся в них гелий присутствует в структуре минерала в виде твердого раствора и прочно удерживается им. Проведенные Карром и Калпом [Carr, Kulp, 1953] аналогичные исследования базальтов привели их к тому же выводу.

В гранитах значительное содержание радиоактивных элементов отмечается в тонких вторичных пленках на структурах пороодо-

образующих минералов и вдоль трещин. Опыты Харлея [1956] по изучению выщелачиваемости радиоактивных изотопов из такого рода поверхностных загрязнений показали, что после кислотной обработки минералов поверхностная активность их значительно уменьшается, иногда в 10 и более раз, тогда как повторная обработка мало изменяет  $\alpha$ -активность минерала. Миграция гелия из таких пленок, состоящих нередко из эпидота и окиси железа с примесью радиоизотопов, с особыми затруднениями не связана.

Таким образом, минералы с низкой активностью, радиоактивные элементы в которых распределены равномерно по кристаллическим решеткам, могут при благоприятных условиях сохранить значительную часть образующегося в них гелия. При всех прочих условиях расположения радиоактивных элементов породы теряют большую часть генерируемого ими гелия.

Роль плотности упаковки кристаллов и теплоты диффузии. По данным Э. К. Герлинга [1939, 1957a], диффундирующий по межкристаллическому пространству решетки кристалла гелий передвигается из одной элементарной ячейки в другую скачками, причем каждый такой скачок связан не только с активацией диффундирующего атома, но также и тех атомов или ионов кристалла, которые препятствуют его движению. Естественно, что размеры свободного межкристаллического пространства оказывают существенное влияние на скорость перемещения гелия. В решетках с рыхлой структурой, со значительными размерами свободного межкристаллического пространства, гелий диффундирует легче, встречая меньше сопротивлений на своем пути, и, следовательно, каждое его перемещение происходит с меньшими затратами энергии на активацию атома. Чем плотнее упакована структура, тем труднее диффундировать гелию сквозь нее, тем выше в таких минералах сохранность гелия.

За меру плотности упаковки кристаллов принимают обычно объем, приходящийся на 1 атом кислорода. Теоретически наиболее плотной упаковке соответствует объем в  $13,9\text{Å}^3$ . Основная масса пороодообразующих минералов характеризуется неплотной упаковкой кристаллической решетки. Особенно рыхлую структуру минералов имеют полевые шпаты и нефелины. Исследование зависимости между плотностью упаковки решетки минералов и сохранностью гелия, выполненное Э. К. Герлингом, показало, что самая высокая потеря гелия присуща наиболее рыхлым кристаллическим структурам, т. е. альбиту, лабрадору и кварцу, тогда как гематиту, характеризующемуся более плотной упаковкой решетки, свойственны меньшие потери гелия (табл. 37).

Изучая вопрос об улетучиваемости гелия, Кивил [Keevil, 1941] предложил называть долю гелия, сохранившегося в минерале, фактором сохранности.

И. Е. Старик [1961], сопоставив значения факторов сохранности, определенных Кивилом на основании значительного числа

Таблица 37

Зависимость между плотностью упаковки и потерей гелия из отдельных минералов [Герлинг, 1939]

Минерал, место взятия пробы	Геологический возраст	Плотность упаковки, $\text{Å}^3$	Потери гелия, %
Альбит, США	D	21,6	83
Лабрадор, США	pCm	21,4	80—90
Известняк, СССР	P	20,3	95
То же	P	20,3	88
Кварц, США	D	18,7	75
Сфен, Норвегия	pCm	18,4	73
То же	pCm	18,4	68
Сфен, Канада	pCm <sub>1</sub>	18,4	60
	pCm <sub>1</sub>	18	40—50
Доломит, СССР	Pz <sub>1</sub>	16,7	40—50
Гематит, Ирландия	Pg (?)	16,7	40—50
Гематит, Каэн	D	16,7	60

определений, и величины плотности упаковки минералов по Э. К. Герлингу, пришел к выводу, что, несмотря на очевидное соответствие между сохранностью гелия и плотностью упаковки кристалла, имеются и существенные расхождения (табл. 38). Так, кварц и магнетит, характеризуясь близкими величинами плотности упаковок, в среднем 18,7 и 18,5  $\text{Å}^3$ , имеют существенно разные факторы сохранности гелия — 0,25 и 0,5. Следовательно, хотя данные о плотности упаковки решеток образующих гелий минералов и позволяют получить ориентировочное представление о масштабах возможной потери гелия из них, но использовать их для окончательного суждения по этому вопросу следует лишь с привлечением дополнительных данных, определяющих структурные особенности решеток кристаллов.

Таблица 38

Фактор сохранности гелия и плотность упаковки минералов [Старик, 1961]

Минерал	Фактор сохранности, по Кивилу [Keevil, 1941]		Плотность упаковки, по Э. К. Герлингу [1939]
	Пределы колебаний	Среднее *	
Гранат	0,2—2,7	0,65	15,8—18,1
Пироксен	0,2—2,2	0,6	17,4—21,1
Биотит	0,2—1,2	0,5	19,3—20,4
Магнетит	0,2—1,2	0,5	18,5
Кварц	0,04—1,2	0,25	18,7
Полевой шпат	0,02—0,5	0,2	21—23

\* Среднее бралось из значений, меньших 1,1.

В частности, большое значение в процессе диффузии гелия имеет спайность кристаллов. По направлению, перпендикулярному к плоскости спайности, энергия связи между ионами наиболее слаба, следовательно, диффузия гелия по спайности будет встречать наименьшие трудности, и по этому направлению кристалла главным образом и пойдет перемещение гелия [Герлинг, 19576].

Разрыхлению структуры кристаллов и, следовательно, потере гелия из них способствуют также различные посторонние включения, захватываемые минералами в процессе кристаллизации, а также при вторичной минерализации.

Одним из наиболее четких критериев оценки сохранности гелия в минералах является теплота его диффузии. В соответствии с определением, данным Э. К. Герлингом [1957a], теплота диффузии гелия характеризует то энергетическое состояние гелия и атомов или ионов твердого тела, при котором происходит перемещение гелия из одной элементарной ячейки кристалла в другую.

Выполненные им расчеты показали, что минимальные значения теплоты диффузии, гарантирующие сохранность гелия в минерале, составляют 35—36 ккал на 1 г-атом гелия при условии, если минерал не содержит значительных количеств посторонних примесей, разрыхляющих структуру. Экспериментальное определение теплоты диффузии гелия в минералах производится при их нагревании. Теплота диффузии вычисляется по данным кривых, характеризующих процесс выделения гелия из минералов при различных температурах их нагревания.

Исследования над выделением гелия из минералов при их нагревании показали, что гелий присутствует в минералах в различных положениях и его удаление из минералов происходит по частям при разных температурах. Прежде всего уходит из минерала гелий, заполняющий узкие каналы и трещины в структуре минерала. Значение теплоты диффузии составляет при этом 6—9 ккал/моль.

Активизация диффузии по спайностям требует приложения значительно большей энергии. Для одного из образцов монацита она составила 27,8 ккал/моль. Выделение гелия из ячеек кристалла того же монацита, расположенных между двумя соседними сетками спайности, имело место только при теплоте диффузии 41,4 и 50,3 ккал/моль.

В гл. II приводились данные о высокой диффузионной способности гелия через отдельные сорта стекол. Исследования их теплоты диффузии показали, что для кварцевого стекла она составила всего 5,7 ккал/моль [Sai, Hugness, 1932], для стекла пирекс — 8,1 ккал/моль [Bagger, 1934]. Следовательно, диффузия гелия сквозь эти типы стекол происходит, в сущности, по узким каналам в их структуре, а не сквозь них. Наличие капилляров в стеклах было подтверждено рентгенографическими исследованиями.

Чем выше теплота диффузии гелия, тем меньше его потери из минералов. Наиболее высокие значения теплот диффузии отмечаются обычно для минералов с наиболее плотной и устойчивой упаковкой кристаллической решетки. Это дает основание предположить, что



основная масса породообразующих минералов, обладающих неплотной упаковкой, будет характеризоваться невысокими значениями теплоты диффузии гелия и, следовательно, значительными потерями гелия.

Влияние вторичных изменений в структуре минералов и пород на потери ими гелия. Всякое нарушение целостности минералов и пород, вызванное любыми причинами, будет способствовать увеличению потери ими гелия в связи с увеличением раскрытости кристаллических структур и созданием дополнительных каналов для утечки гелия. Помимо термических и различных механических воздействий существенную роль в нарушении целостности структуры минералов имеют химические реакции, радиационные воздействия, процессы перекристаллизации и изменения кристаллической структуры — полиморфные превращения, метаморфизация и т. п.

Масштабы проявления указанных процессов весьма неодинаковы, но в ряде случаев, особенно при явлениях метаморфизации, охватывающей большие массивы пород, они могут приобретать существенное значение, способствуя значительным потерям гелия из образующих его пород.

Рассмотрим физическую сущность отдельных явлений, вызывающих различные изменения в структуре кристаллов, облегчающих утечку из них гелия.

*Радиационные повреждения.* Кристаллические решетки минералов, включающие в себя радиоактивные элементы, испытывая постоянное воздействие радиационного излучения, подвергаются распаду и переходу в метамиктное состояние. Структура решетки постепенно дезорганизуется, минеральное вещество превращается в аморфное, несколько увеличивается его объем, поверхность граней кристаллов искажается. В таком виде минералы уже не в состоянии удерживать образующийся в них гелий и легко теряют его.

Особенно интенсивно воздействуют на элементы структуры минералов  $\alpha$ -частицы, т. е. сами ядра гелия. Начальные скорости  $\alpha$ -частиц, испускаемых радиоактивными источниками, измеряются в пределах  $(1,4-2,2) \cdot 10^9$  см/сек. Такие огромные скорости позволяют  $\alpha$ -частицам проходить сквозь структуры молекул и атомов практически без отклонений. Радиационные воздействия частиц высоких энергий приводят к смещению атомов и ионов из узлов кристаллической решетки минералов. В структуре циркона, например, каждый  $\alpha$ -распад воздействует на  $4,5 \cdot 10^3$  атомов минерала.

Исследование радиационных эффектов в твердых телах показало, что смещение атомов твердого тела из первоначальных положений приводит к значительным структурным изменениям — аморфизации, раскристаллизации, полиморфным превращениям и т. п.

Зона распределения активных нарушений состояния решетки вследствие радиационных воздействий определяется общим количеством радиоактивного вещества, излучающего заряженные частицы, энергией движущихся заряженных частиц, продолжительностью

радиационного воздействия, а также плотностью кристаллической решетки облучаемого минерала, его составом и структурой, определяющих интенсивность каскадного процесса из смещенных атомов, возникающего при взаимодействии излучения с веществом, и т. п.

Ионизация и электронные возбуждения, возникающие при прохождении  $\alpha$ -частиц сквозь твердое тело, приводят в ряде случаев к разрыву связей в структуре решетки, к окрашиванию, люминесценции и другим радиационным эффектам. Естественно, что чем выше доза облучения, получаемая минералом, тем глубже в нем структурные изменения.

Исследования, выполненные Харлеем [1956], показали, что в минералах, испытывающих интенсивную бомбардировку  $\alpha$ -частицами, теряется почти весь гелий. Активности вторичного циркона в гранитах, составляющей обычно около 1000  $\alpha$ -частиц/мг, достаточно для возникновения значительных радиационных повреждений.

Однако в целом масштабы структурных изменений в кристаллах пород вследствие ионизации в естественных условиях обычно невелики, так как зона радиационных воздействий, обогащенных радиоизотопами минералов, присутствующих в породах главным образом в виде аксессуарных включений, ограничена, и только на участках рудных тел радиационные дефекты в структурах минералов приобретают более широкие масштабы, способствуют значительной потере генерируемого ими гелия.

*Термическое воздействие.* Усиление энергии теплового движения атомов, образующих решетки минералов, при значительном повышении температуры способствует разрыхлению кристаллических решеток, а при температурах плавления — полному их разрушению. Помимо усиления колебательных движений атомов и ионов нагревание минералов способствует их растрескиванию, приводящему к нарушению целостности и созданию путей для утечки гелия. Потери гелия минералами вследствие термических воздействий начинают интенсивно проявляться только при достаточно высоких температурах, причем неодинаковых для различных минералов.

Следует отметить, что нагревание пород примерно до 300—400° С не оказывает существенного влияния на интенсификацию потерь гелия из минералов, и только при более высоких температурах начинается заметная потеря гелия породами, достигающая максимума при температурах, близких к температуре их плавления.

Увеличение интенсивности диффузии гелия из минералов и пород при повышении их температуры позволяет сделать вывод, что массивы пород, испытавшие значительное повышение температуры в результате термального метаморфизма, могли потерять значительную часть образовавшегося в них гелия.

При этом наибольшие потери гелия могут произойти, по мнению Э. К. Герлинга [1957], и при сравнительно низком нагревании — 300—400° С, действовавшем в течение длительного времени, например, при опускании пород на глубину при различного рода тектонических подвижках и т. п.

Влияние состава газовой фазы окружающей среды. Экспериментальные исследования, выполненные В. Г. Хлопиным, Э. К. Герлингом и Э. М. Иоффе [1957], показали, что на характер выделения гелия из урановых минералов существенное влияние оказывает состав газовой фазы — среды, в которой происходит дегазация минералов. При одной и той же температуре гелий выделяется в среду азота менее интенсивно, чем в вакуум, тогда как в водородную, углекислую и углеводородную — во много раз быстрее (табл. 39). Для ториевых минералов столь существенной разницы в степени дегазации не отмечалось.

Таблица 39  
Выделение гелия из минералов в атмосфере различных газов  
(по данным В. Г. Хлопина, Э. К. Герлинга и Э. М. Иоффе, 1957)

Минерал	Газовая среда	Температура нагрева, °C	Потери гелия, %
Уранинит	Вакуум . . . . .	600	34,5
	Азот . . . . .	600	32,8
	Оксид углерода . . . . .	600	76,8
	Метан . . . . .	600	40,0
	Тяжелые углеводороды . . . . .	600	80,5
	Водород . . . . .	600	76,3
Монацит	Вакуум . . . . .	900	80,0
	Оксид углерода . . . . .	900	77,9
	Водород . . . . .	900	75,3

Механизм стимулирующего действия газов на выделение гелия из минералов объясняется, по мнению экспериментаторов, как химическим взаимодействием элементов газовой фазы с атомами и ионами решетки минералов, приводящим к увеличению внутренней поверхности минерала за счет процесса восстановления урана, так и явлениями вытеснения гелия, адсорбированного на активных центрах внутренней поверхности минералов молекулами или атомами других газов.

Влияние механических и химических воздействий и возраста минералов. Исследование характера потери гелия минералами при их измельчении было начато еще в 1906 г. Моссом, Стретт и Грей [Харлей, 1956], измельчая ториянит и монацит, обнаружили, что часть гелия теряется минералами немедленно, сразу же после измельчения. Причем, чем тоньше измельчен минерал (до 3 мк), тем больше выделяется гелия, но в среднем не более 30%. Остальной гелий частично удерживается в минералах, а частично медленно теряется ими, скапливаясь у вновь образованных поверхностей, и улетучивается с них.

Результаты экспериментов, выполненных многими исследователями, показали, что количество выделяющегося гелия при измельче-

нии различных минералов неодинаково и достигает в ряде случаев более 90% [Старик, 1961]. По данным Кивила [Keevil, 1942], при истирании кварца от 60 до 200 меш теряется около 30% гелия. Увеличивается потеря гелия из одних и тех же образцов пород и при их длительном хранении. Определения возраста минералов по гелиевому методу, выполненные Кивилом, показали, что возраст образца гранита, определенный спустя год после его отбора, уменьшился на 21 млн. лет, кварца — на 19 млн. лет, долового шпата — на 25 млн. лет. В среднем потери гелия у исследованных образцов пород при их хранении составили за год около 20—30%.

Таким образом, различные процессы разрушения и выветривания горных пород способствуют значительным потерям гелия. Следует отметить, что потери гелия отмечаются в основном для минералов, характеризующихся рыхлой кристаллической решеткой. Прочные устойчивые минералы с плотной упаковкой решетки и высокими значениями теплот диффузии обычно хорошо сохраняют гелий. Так, возраст магнетитов Тянь-Шаня, намытых из озерных и речных шлихов, определенный гелиевым и аргонным методами, почти совпал, что свидетельствует о высокой сохранности гелия в шлиховых магнетитах [Крылов, 1955, Крылов и др., 1958].

Большое влияние на сохранность гелия в породах оказывают различные химические реакции. Наблюдаемые при этом изменения объемов реагирующих пород, их перекристаллизация и т. п. приводят к нарушению целостности первичных структур минералов и потере ими гелия.

Так, например, в результате распада  $UO_2$  образуется  $PbO$ , которая уже не может изоморфно заменить  $UO_2$  и создает нарушение в структуре минерала. Чем больше возраст радиоактивного минерала, чем больше образуется продуктов радиоактивного распада, тем глубже нарушение в структуре решетки минералов, тем больше потеряне ими гелия. Снижение сохранности гелия с увеличением возраста минералов было подтверждено Кивилом [Харлей, 1956]. Исследуя содержание гелия в разновозрастных базальтах и диабазлах, он определил, что сохранность гелия в минералах, выкристаллизовавшихся в миоцене, составила 60%, в триасе — 45% и в докембрии — 34%.

Характерно, что различные минералы одного образца породы нередко имеют различные потери гелия. Так, определенный гелиевым методом возраст доловых шпатов из триасовых диабазов, вероятный истинный возраст которых 160 млн. лет, оказался равным 36 млн. лет, шпрингситы из тех же образцов пород имели возраст 108 млн. лет, и лишь магнетитовые концентраты, свободные от примесей, давали в среднем 160 млн. лет [Харлей, 1956], т. е. возраст, близкий истинному.

Резюмируя вышесказанное, можно отметить, что степень сохранности гелия, генерируемого в различных минералах крайне неодинакова. В ряде случаев гелий почти полностью сохраняется в решетках образовавшихся его минералов, но в большинстве

породообразующих минералов он в значительной мере теряется. Сохранность гелия в минералах определяется как внутренними свойствами структур кристаллических решеток, так и химико-физическими условиями и длительностью их существования в недрах.

В целом можно отметить, что гелий значительно более легко теряется крупнокристаллическими породами, древними по возрасту, находящимися в неблагоприятных для сохранности гелия химико-физических условиях. Так, граниты легко теряют генерируемый ими гелий, базальты — значительно труднее. В связи с этим общая оценка масштабов потерь гелия различными массивами пород должна производиться дифференцированно с учетом как состава, структуры и возраста основных породообразующих минералов, так и тех физико-химических условий, в которых они находились.

### Физические условия и направление миграции гелия в недрах

Пути миграции гелия, выделяющегося из генерирующих его минералов, сложны и многообразны, но мало изучены.

Оценка характера и направления миграции гелия в недрах может быть дана только в весьма ориентировочной форме, основанной главным образом на теоретических представлениях по этим вопросам.

**Формы движения гелия в недрах.** Основными формами движения гелия, так же как и любого другого газа в недрах, являются диффузия и фильтрация, но в отличие от других газов доля гелия, диффундирующего сквозь породы, значительно выше в связи с его высокими диффузионными свойствами.

Диффузия гелия осуществляется отдельными атомами сквозь структуры пород, фильтрация происходит обычно в смеси с другими флюидами по капиллярам, сообщающимся порам, трещинам и любым другим пространствам пород, заполненным как газами и парами, так и жидкостями. Диффузия гелия идет повсеместно при условии наличия химического потенциала, со скоростью, определяемой градиентами его упругости и проницаемостью вмещающей среды.

Фильтрация гелия носит более локальный характер и осуществляется только на участках наличия открытой, сообщающейся системы капилляров, пор или трещин в породах, т. е. происходит главным образом в верхней зоне коры и осадочной толще.

Следует отметить, что помимо молекулярной диффузии, при которой перенос гелия осуществляется тепловым движением отдельных его атомов, в недрах земли имеет место также и перенос гелия вместе с движением масс вещества за счет явления так называемой свободной, или естественной, конвекции. Наличие процесса переноса масс вещества в земных недрах подтверждается их дифференциацией по составу. Причиной конвекции вещества служат различные физико-химические потенциалы в недрах — разности давлений, температур или концентраций.

Увлечение гелия движущимся потоком массы вещества изменяет направление его диффузионного движения. Диффузия гелия в недрах может происходить сквозь твердое вещество пород, а также сквозь воду и газы, заполняющие различные пустоты пород. Коэффициент диффузии гелия в жидкости в  $10^4$ — $10^5$  раз меньше, чем в газах, и еще на несколько порядков величин меньше он в твердых телах. Следовательно, при наличии пустот диффузия гелия идет преимущественно по капиллярам, порам и трещинам, заполненным флюидами.

В отличие от глубоких сфер Земли диффузия гелия в осадочной оболочке земной коры осуществляется преимущественно не сквозь твердое тело пород, а сквозь флюиды, заполняющие поры пород, в связи со значительной разницей в диффузионной проницаемости газов, жидкостей и твердых пород, равной соответственно как  $1 : 10^{-5} : (10^{-10} \div 10^{-15})$  см<sup>2</sup>/сек. При этом гелий диффундирует с большей скоростью сквозь пресные воды, чем сквозь растворы с высокой концентрацией, так как коэффициент диффузии уменьшается обратно пропорционально кинематической вязкости раствора.

Фильтрация гелия в недрах происходит по сообщающимся порам и трещинам в породах вместе с теми флюидами, в которых он растворен. В случае высоких скоростей фильтрации, когда скорость движения гелия, растворенного во флюидах, несопоставимо больше скорости его диффузии, направление и скорость его миграции совпадают с направлением и скоростью движения флюида-растворителя. При незначительных скоростях движения флюида, сопоставимых со скоростью диффузии гелия, на направление движения гелия вместе с флюидом будет накладываться его собственное диффузионное движение, обусловленное градиентом концентрации. Результирующим направлением движения мигрирующего гелия будет некоторая равнодействующая этих двух сил.

Передислокация газов и нефтей в недрах вместе с содержащимся в них гелием способствует в ряде случаев его массовому переносу в верхние горизонты за короткие интервалы времени. При этом возможно образование зон аномальной упругости гелия на отдельных участках в недрах, что обуславливает возникновение локальных градиентов упругостей гелия.

**Причины и направление движения гелия в глубоких недрах Земли.** Основными причинами, обуславливающими движение гелия в глубоких недрах и его потерю, являются разность химических потенциалов гелия в недрах и в космосе, его высокая летучесть и проницаемость, обусловленная малыми размерами атомов гелия, его легкостью и полной инертностью в естественных условиях земных недр, исключая возможность образований каких-либо его соединений с другими элементами и, таким образом, задержку в недрах.

Земля, обогащенная в коровой части радиоактивными элементами, непрерывно образует гелий, создавая его избыточный потенциал относительно своей внешней газовой оболочки. Величина потенциала постепенно изменяется со временем в связи с распадом

радиоактивного вещества, а также накопления продуктов распада, которым, в частности, является и гелий. В первичной стадии существования планеты, до начала действия процессов ее внутренней активности, когда радиоактивное вещество было равномерно рассеяно по всей ее массе, генерация гелия шла равномерно по всему объему Земли. Общее количество радиоизотопов в веществе планеты было значительно выше современного, соответственно были выше и гелиегенерирующие возможности Земли. Значительно меньшая величина плотности вещества Земли до начала ее активности способствовала постепенной утечке высоколетучего гелия из ее недр в окружающее космическое пространство. После начала действия процессов внутренней активности Земли произошло расслоение ее вещества, процессы генерации гелия шли уже неравномерно по всему объему Земли. Кроме того, в связи с процессами непрерывного распада радиоактивных элементов уменьшилось их общее количество в недрах.

На основе данных табл. 35, можно рассчитать, что  $1 \text{ см}^3$  вещества ядра Земли ежегодно образует  $39,4 \cdot 10^{-19} \text{ г}$  гелия, мантии —  $21,3 \cdot 10^{-19} \text{ г}$ , а земной коры —  $17,2 \cdot 10^{-17} \text{ г}$ , или соответственно  $22,1 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3$ ,  $11,9 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3$  и  $963,2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^3$  гелия.

Основной формой переноса гелия в глубоких сферах Земли является, по-видимому, его диффузия и конвективный перенос движущимися флюидами (парами, газами, расплавами и т. п.).

Диффузия — это процесс, зависящий в основном от межмолекулярных столкновений, интенсивность которых определяется в конечном итоге температурой и плотностью среды. С ростом температуры значительно возрастает внутренняя энергия вещества \* и, в частности, гелия (рис. 3).

По современным представлениям, температура Земли на глубине 100 км составляет в настоящее время примерно  $1000\text{--}1200^\circ \text{C}$ , а на границе ядра близка к  $3500^\circ \text{C}$  [Верхуген, 1958]. Предполагается, что ранее температура недр Земли была значительно выше. Как видно из графика на рис. 3, внутренняя энергия атомов гелия возрастает по мере приближения к ядру примерно в 11 раз, а на отдельных участках с более высокой температурой возможно и выше.

Вместе с ростом внутренней энергии при повышении температуры резко возрастает и скорость движения атомов гелия.

Приняв, что  $v = 0,158 \sqrt{\frac{T}{m}}$ , где  $v$  — средняя скорость атома (молекулы), км/сек,  $m$  — его масса в атомных единицах, а  $T$  — температура, градусы Кельвина, можно рассчитать, что при  $T = 273^\circ \text{K}$  ( $0^\circ \text{C}$ ) средняя скорость движения атомов гелия ( $m = 4$ ) составляет  $1,31 \text{ км/сек}$ , при  $T = 1273^\circ \text{K}$  ( $1000^\circ \text{C}$ )  $v = 2,82 \text{ км/сек}$ , а при  $T = 3773^\circ \text{K}$  ( $3500^\circ \text{C}$ )  $v = 4,85 \text{ км/сек}$ . При этих же температурах

\* Величина внутренней энергии характеризует состояние вещества, или общий запас энергии системы (первый закон термодинамики). Она включает энергию всех форм движения атомов и молекул — поступательного, вращательного, колебательного и т. д. Внутренняя энергия идеального газа не изменяется с изменением давления.

скорость движения молекулы кислорода ( $m = 32$ ) составляет 0,47; 1,00 и 1,81 км/сек, т. е. значительно меньше.

Таким образом, при повышении температуры подвижность атома гелия резко возрастает сравнительно с другими атомами и молекулами, слагающими вещество Земли. Однако по мере углубления одновременно с увеличением температуры увеличиваются и давления, а вместе с ними и плотность вещества, сквозь которое должен диффундировать гелий. При приближении к ядру плотность вещества Земли увеличивается примерно в три раза. Следовательно, по мере углубле-

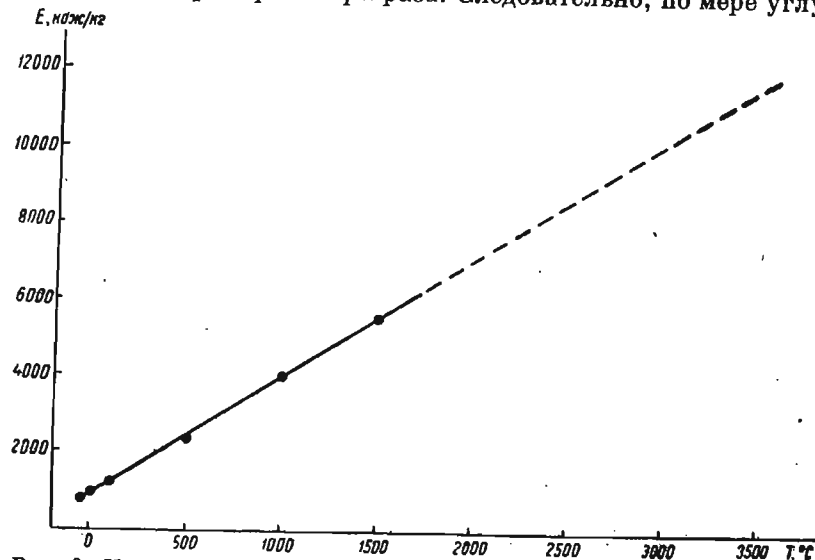


Рис. 3. Изменение величины внутренней энергии гелия с ростом температуры (сплошная линия — по данным С. Л. Ривкина [1964], пунктирная — экстраполированная).

ния увеличивается не только внутренняя энергия гелия, способствующая его диффузии в недрах, но также и внутреннее сопротивление среды, в которой происходит диффузия, что значительно затрудняет движение глубинного гелия к поверхности.

Способствуют переносу гелия из недр во внешние зоны Земли и те конвективные потоки вещества, которые имели место при процессах дифференциации состава. Эти же потоки, хотя и в меньших масштабах, подолжают, видимо, действовать и в настоящее время, перенося наиболее летучие компоненты, в том числе и гелий, во внешние зоны Земли.

Таким образом, движение гелия из внутренних частей Земли к внешним и далее, в космос, неизбежно благодаря однонаправленному уменьшению уровня энергии системы в целом, обусловленному снижением как химического потенциала, так температуры и давления в сторону космического пространства, но происходит оно чрезвычайно медленно даже в масштабах геологического времени.

## Масштабы миграции гелия из недр и его диссипация в космос

Масштабы миграции гелия в недрах могут быть оценены непосредственно аналитическими методами, а также косвенно — по потерям из пород или по балансу гелия в атмосфере. Использование двух первых методов крайне затруднено в связи с неясностью величин многих расчетных параметров, третий метод применяется чаще других и дает наиболее достоверные результаты.

Аналитическая оценка масштабов переноса гелия из недр возможна на основе уравнения Фика с учетом конвекции. Однако практически при решении этого уравнения применительно к поставленной задаче приходится сталкиваться с непреодолимыми трудностями при выборе величин расчетных параметров, входящих в формулу.

Коэффициенты диффузии переменны по величине не только в связи с изменением состава пород в недрах, но также в связи с изменением их плотности и температуры. Температуры к ядру Земли возрастают до 3000—5000° С, давление до 2—3 млн. ат, плотность вещества Земли при этом достигает 11—17 г/см<sup>3</sup> при средней плотности Земли 5,5 г/см<sup>3</sup>. Никакими экспериментальными данными о коэффициенте диффузии в веществе при физических условиях мантии и ядра мы не располагаем. Не известны концентрации гелия в недрах и, следовательно, их градиенты, входящие в уравнение Фика. Концентрации гелия определяются не только генерирующими возможностями пород, изменяющимися во времени, и их возрастом, но и масштабами потери гелия, т. е. той величиной, которую необходимо определить. Можно лишь предполагать, что градиенты концентрации гелия в глубоких недрах Земли неуловимо малы по своим абсолютным величинам.

Не ясен вопрос о масштабах переноса гелия путем конвекции масс. Поэтому расчеты, выполненные на основе даже кажущегося правдоподобным подбора величин всех параметров, входящих в уравнение Фика, не могут быть достоверными, т. е. не будут иметь никакого практического значения.

Метод косвенной оценки масштабов миграции гелия в недрах по его потерям из пород приемлем, в сущности, только для пород внешней зоны земной коры. Применение этих же данных к более глубоким недрам не правомерно.

Выше отмечалось, что отдельные минералы с наиболее высокими величинами теплот диффузии, такие, как магнетит, хлопинит и другие, характеризуются невысокими потерями гелия — 5—10%. Однако возраст исследованных минералов сравнительно редко превышает 0,5—0,6 млрд. лет. Для пород со столь же прочными структурными связями, как у этих минералов, но более старших по возрасту, потери гелия будут тем выше, чем больше их возраст и чем более высокие температуры они испытали за время своего существования.

Некоторые исследователи, например Юнге [1965], полагают, что выход гелия из мантии вообще маловероятен. Нам это представление не кажется убедительным. Процессы дифференциации вещества планеты не могли не затронуть такой легкоподвижный элемент как гелий. С нашей точки зрения, миграция гелия, образующегося в глубоких недрах Земли при процессах  $\alpha$ -распада, безусловно, имеет место, хотя и в незначительном масштабе. В ее основе лежат как процессы диффузии элемента, так и главным образом конвективный перенос.

Диффузия гелия осуществляется, по-видимому, крайне медленно и может быть заметна только для граничных сфер, например, в низах земной коры может присутствовать гелий верхних частей мантии и т. п. Конвективные переносы масс вещества планеты значительно более активны и могут способствовать перемещению глубинного гелия на значительно большие расстояния, чем при процессах диффузии. Относительно много глубинного гелия поступило на поверхность вместе с магмой и сопровождающими ее газами.

На основе величины потерь гелия минералами, а также учитывая возраст планеты, можно ориентировочно предположить, что общие потери гелия ядром и мантией со времени основного формирования геосфер не превышают 5—10%. Кора за время своего существования в современном объеме могла потерять 10—20% накопившегося в ней гелия.

Расчет объема мигрирующего к поверхности потока гелия, выполненный Харлеем [1956], показал, что средний поток гелия к поверхности должен быть по меньшей мере около  $10 \text{ см}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$  даже в устойчивых кристаллических областях. В основу расчета им положено, что содержание гелия в земной коре до глубины поверхности слоя Мохоровичича в древних континентальных районах составляет около  $10^9 \text{ см}^3/\text{м}^2$ . Потери гелия приняты по данным исследований свежих образцов гранитных пород с глубины 1 км в туннеле Адамс примерно равными 75%.

Линдеман (Майн, 1956) на основе подсчетов количества выветрелых пород предполагает, что благодаря эрозии выделяется около  $1,5 \cdot 10^6$  атомов гелия на  $1 \text{ см}^2/\text{сек}$  земной поверхности, что составит  $1,75 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$ .

Кюнел [Рухин, 1958] полагает, что объем выветрелых пород, принятый при расчете —  $8,33 \cdot 10^{23} \text{ г}$ , занижен примерно вдвое, т. е. с поправкой Кюнелена скорость утечки гелия из пород в связи с их эрозией составляет  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год}$ , т. е. будет находиться в тех же пределах, что и рассчитанная нами по потерям за счет диффузии из недр.

Наиболее обоснованные представления о масштабах потери гелия недрами могут быть получены при исследовании гелиевого баланса атмосферы. В основу метода положено предположение о том, что масштабы поступления гелия из недр в атмосферу и его потери в космос вследствие диссипации соизмеримы, т. е. современная концентрация гелия в атмосфере соответствует равновесным условиям.

Следовательно, определив величину потери Землей гелия в космос, можно определить величину его поступления из недр в атмосферу. Рассмотрим подробнее явления утечки (диссипации) гелия в космос.

Сущность процесса диссипации состоит в том, что в верхних слоях ионосферы атом, движущийся вверх, может в условиях крайне разреженного состояния вещества (менее  $1 \cdot 10^{-12}$  плотности на поверхности), не испытать соударения с другими атомами и при этом иметь скорость, превышающую некоторое критическое значение, позволяющую ему преодолеть гравитационное притяжение Земли и уйти в межпланетное пространство. Впервые на возможность явления диссипации газов земной атмосферы в космос обратил внимание Стоуней (1911). На основе этого В. И. Вернадский еще в 1912 г. высказал предположение, что благодаря диссипации имеет место постоянная утечка гелия из недр и атмосферы. Эту потерю гелия Землей он образно назвал «гелиевым дыханием Земли».

Чем меньше масса частицы и выше температура, тем, естественно, больше скорость ее движения и меньше вероятность соударения, тем благоприятнее условия ее диссипации. Вычисления, выполненные Шинцером [Койнер, 1951], показали, что только легчайшие атомы Земли — водород и гелий — покидают Землю со скоростью, достаточной, чтобы быть замеченной в масштабах геологического времени.

Скорость диссипации находится в прямой зависимости от концентрации гелия и температуры в экзосфере. Диссипация гелия происходит главным образом на высотах 400—1000 км при температурах примерно  $1800^\circ\text{C}$ . Спорадически температура в экзосфере может повышаться до  $2300^\circ\text{C}$ , что резко увеличивает скорость диссипации. Эти случайные повышения температуры, обусловленные усилением солнечной активности, занимают в общей сложности примерно 2% геологического времени (по Шинцеру, Бейтс, 1961).

В зависимости от температуры, т. е. практически от солнечной активности, время жизни гелия на уровне верхней границы термосферы резко меняется. Параметры диссипации гелия, подсчитанные Николе [Nicolet, 1964], подтверждают это (табл. 40).

Таблица 40  
Параметры диссипации гелия

Н, км	T, °K	Вероятность убегания, сек <sup>-1</sup>	Время жизни, годы
400	1700	$1,7 \cdot 10^{-9}$	13
500	2130	$3,4 \cdot 10^{-8}$	0,65

При концентрации гелия в термосфере  $10^8$  атомов/см<sup>3</sup> утечка из экзосферы достигает, по данным Николе,  $10^6$  атомов/сек при

$2000^\circ\text{K}$ . Такая диссипация соответствует времени жизни около 1 года.

Убыль гелия из экзосферы за счет его диссипации (при условии равновесия между поступлением гелия в атмосферу и его ускользанием в космос) должна постоянно компенсироваться равновеликим диссипированному потоком гелия снизу.

Следовательно, для обеспечения равновесия скорость вертикального переноса гелия из недр Земли при указанных Николе условиях должна восполнять потери менее чем за один год. Расчеты, выполненные этим же исследователем, показали, что для области 100—120 км максимальное возможный поток гелия в атмосферу за счет диффузии равен  $9 \cdot 10^7$  ат·см<sup>-2</sup>/сек, т. е. диффузия может легко поддерживать поток атомов гелия  $10^6$  см<sup>-2</sup>/сек, который и соответствует интенсивности источника поступления гелия в атмосферу, т. е. практически масштабам его миграции из недр. С помощью сопоставления масштабов образования и потерь гелия Землей с фактически существующим количеством гелия в атмосфере могут быть рассчитаны время пребывания гелия в атмосфере Земли и соответственно масштабы его утечки в атмосферу или из нее.

По Юнгу [1963], время пребывания газа в резервуаре атмосферы определяется его общим количеством  $M$  и интенсивностью его образования (выделения)  $F$  или убывания (распада)  $R$ :

$$\tau = \frac{M}{F} = \frac{M}{R}.$$

Равновесие осуществляется при условии  $F = R$ .

Общее количество гелия в атмосфере составляет примерно  $5,3 \times 10^{28}$  атомов [Дамон, Кулп, 1958]. На основе несколько различных данных об интенсивности образования гелия в недрах Юнге [1963] и Николе (1964) подсчитали, что все имеющееся количество гелия в атмосфере могло образоваться за  $(2 + 3,5) \cdot 10^6$  лет. Если учесть, что возраст Земли и ее атмосферы значительно выше и составляет  $3 \cdot 10^9$  лет, то при постоянной скорости поступления гелия в атмосферу за время существования Земли он мог полностью обновиться по крайней мере 1000 раз. На это обстоятельство обращали внимание многие исследователи. Общий дефицит гелия относительно его образования в недрах впервые был отмечен в 1912 г. В. И. Вернадским [1955].

Оригинальные расчеты скорости утечки гелия в атмосферу, а также из нее выполнены Дамоном и Кулпом [Damon, Kulp, 1958]. По их расчетам скорость утечки гелия в атмосферу или из нее равна

$$Q_{\text{He}} = \frac{0,693C}{T},$$

где  $Q_{\text{He}}$  — скорость утечки гелия, атомы за год;  $C$  — количество гелия в атмосфере, равное  $5,3 \cdot 10^{28}$  атомов для  $\text{He}^4$  и  $6,4 \cdot 10^{32}$  атомов для  $\text{He}^3$ ;  $T$  — полупериод выделения гелия, годы.

При расчете полупериода выделения гелия Дамоном и Калпом использованы данные о скорости образования легкого изотопа гелия в атмосфере под влиянием космогенных факторов и о температуре экзосферы, обеспечивающей эквивалентную диссипацию  $He^3$  в космос. Решая путем подбора различных температур экзосферы несколько преобразованное уравнение Шпицера, Дамон и Калп построили график величин полупериодов выделения  $He^3$  и  $He^4$  из экзосферы при различных температурах (рис. 4). На основе этого графика и расчета фактической величины  $T_{He^3}$ , равной

$$T_{He^3} = \frac{0,693C}{Q} = \frac{0,693 \cdot 6,4 \cdot 10^{32}}{3,1 \cdot 10^{28}} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ лет,}$$

они определили, что температура экзосферы, обеспечивающая утечку всего образующегося количества легкого изотопа гелия за рассчитанный период в  $1,4 \cdot 10^6$  лет, составляет примерно  $1880^\circ \text{K}$ . При указанной температуре полупериод выделения  $He^4$  в соответствии с графиком на рис. 4 составляет  $T_{He^4} = 5 \cdot 10^7$  лет. Скорость утечки гелия в атмосферу равна

$$Q_{He^4} = \frac{0,693C}{T_{He^4}} = \frac{0,693 \cdot 5,3 \cdot 10^{38}}{5 \cdot 10^7} = 7,3 \cdot 10^{30} \text{ атомов в год.}$$

Фирман [Fireman, 1953], предшественник Дамона и Калпа в методе расчета, на основе природы  $\alpha$ -распада в породах и их эрозии принял

более высокие цифры времени пребывания  $He^4$  в атмосфере —  $3 \cdot 10^8$  лет. Это время утечки совпадает с температурой  $1500^\circ \text{K}$  в основании экзосферы, что по современным представлениям несколько занижено. Более высокие температуры (на критическом уровне) хотя бы и в короткие периоды времени (при усилении солнечной активности) обусловят увеличение потерь гелия и сокращение времени его пребывания в атмосфере.

Турекьян [Turckian, 1959] пришел примерно к тем же выводам, что и Дамон и Калп, но несколько иным путем. Вместо определения температуры экзосферы, обеспечивающей диссипацию  $He^3$  в количестве, равновесном с его образованием из трития, он воспользовался моделью непрерывной дегазации Земли, подобной модели Шиллибера и Рассела.

На основе рассчитанной им по  $Ar^{40}$  величины константы дегазации, равной  $2,81 \cdot 10^{-11} \text{ лет}^{-1}$ , Турекьян оценил скорость современ-

ного поступления в атмосферу  $He^4$ , равной  $8,66 \cdot 10^{31}$  атомов в год, что всего лишь на один порядок выше цифр, рассчитанных Дамоном и Калпом. При современной степени изученности отдельных параметров расчетов такую сходимость в определении скорости утечки гелия из недр в атмосферу (или из атмосферы в космос), выполненными независимыми методами, следует признать хорошей.

Период полураспада  $T_{He^4}$ , рассчитанный Турекьяном, составляет

$$T_{He^4} = \frac{0,693 \cdot 5,3 \cdot 10^{38}}{8,66 \cdot 10^{31}} = 4,24 \cdot 10^6 \text{ лет.}$$

Принимая среднюю из указанных величин скорости утечки гелия из недр, равной  $9,4 \cdot 10^{31}$  атомов в год, можно подсчитать, что величина подтока гелия к поверхности составляет в среднем  $1,84 \cdot 10^{17}$  атомов, или  $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$  гелия с  $1 \text{ м}^2$  земной поверхности в год.

#### § 4. БАЛАНС ГЕЛИЯ НА ЗЕМЛЕ

В зависимости от целей исследований гелиевый баланс Земли может быть выражен в виде различных уравнений. Уравнение баланса гелия в его генетической форме в соответствии с материалами, изложенными выше, может быть следующим:

$$He = He_{\text{перв}} + He_{\text{рад}} + He_{\text{косм}} - He_{\text{дис}},$$

где  $He$  — общее количество гелия на Земле;  $He_{\text{перв}}$  — первичный гелий, под которым понимается гелий, захваченный протопланетным веществом Земли при ее формировании;  $He_{\text{рад}}$  — вторичный (радиогенный) гелий, образовавшийся в веществе Земли при различных процессах ядерных реакций и радиоактивного распада;  $He_{\text{косм}}$  — космический гелий, поступающий в атмосферу в виде космических  $\alpha$ -частиц, а также вместе с метеоритной пылью и метеоритами;  $He_{\text{дис}}$  — гелий, диссипировавший в космос.

Отдельные элементы гелиевого баланса Земли, такие как гелий радиогенный и даже космический, могут быть оценены с той или иной степенью достоверности, тогда как даже реальность наличия других, например первичного первозданного гелия, весьма проблематична, в связи с чем учесть его долю в общем гелиевом балансе Земли весьма трудно.

По существу, все элементы гелиевого баланса нами уже рассматривались и оценивались в предыдущих разделах, исключая лишь первичный гелий, на более детальной оценке роли которого в общем гелиевом балансе поэтому необходимо остановиться.

Под первичным гелием понимается гелий, захваченный или накопленный веществом Земли при формировании планеты и сохранившийся в глубинных недрах вещества Земли со времени ее формирования. В первичном гелии следует различать гелий, не связанный по своему происхождению ни с какими ядерными реакциями или процессами радиоактивного распада — первозданный гелий,

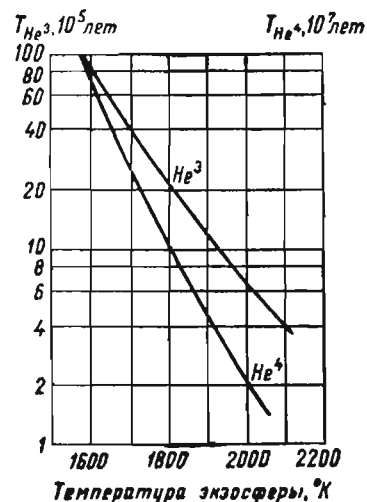


Рис. 4. Зависимость полупериода выделения  $He^3$  и  $He^4$  из экзосферы от ее температуры. [Damon, Kuip, 1958].

и гелий, который образовался в результате распада радиоактивных элементов, присутствующих в тех пылевых частицах, из которых сформировалась впоследствии планета. И тот, и другой гелий является первичным по отношению к формирующейся планете, хотя генезис их совершенно различен.

Впервые на первозданный гелий как на источник гелия на Земле обратили внимание еще в 1910—1915 гг. Муре и в 1921 г. Роджерс (1935).

Обосновывая эту гипотезу происхождения гелия, Роджерс отмечает: «... так как гелий очень распространен на небесных светилах, ... то нет ничего невозможного в предположении, что гелий может и должен находиться во Вселенной совершенно независимо от радиоэлементов. Соответственно, и на Земле значительное количество гелия, может быть, никогда не было связано с радиоэлементами и может рассматриваться как первичный гелий».

Широкая распространенность гелия во Вселенной была подтверждена последующими исследованиями, однако представление Роджерса о присутствии значительного количества гелия на Земле, не связанного с радиоактивными элементами, следует рассматривать как несостоятельное.

Высокое относительное содержание гелия в межзвездном газе вовсе не означает, что его плотность в космосе имеет ощутимую величину. Средняя плотность межзвездного газа в Галактике около  $10^{-24}$  г/см<sup>3</sup>. Если принять за основу, что 23% (по Довлеру) общего состава космического газа приходится на гелий, то его плотность в межзвездном газе составит всего лишь  $2,3 \cdot 10^{-26}$  г/см<sup>3</sup>. Для сравнения отметим, что плотность гелия в атмосферном воздухе составляет около  $9,36 \cdot 10^{-10}$  г/см<sup>3</sup>, т. е. значительно выше. Несомненно, что плотность гелия в составе протопланетного облака могла быть несколько больше, чем в окружающем космическом пространстве, но вряд ли это существенно, так как высокая способность гелия к рассеиванию, обусловленная его малым атомным весом и радиусом, исключает возможность его длительного сохранения в газопылевом облаке в значительных концентрациях, даже если какие-либо неизвестные нам явления и привели бы к его первоначальному накоплению.

Таким образом, доля первозданного, космогенного гелия, не связанного с процессами радиоактивного распада и ядерных реакций, никогда не могла быть ощутимой в гелиевом балансе Земли. Значительно более существенным должен был быть объем первичного гелия, накопленного частицами протопланетного вещества Земли вследствие происходящих в них процессов радиоактивного распада и различных ядерных реакций.

По современным представлениям Земля сформировалась из частиц холодного газопылевого облака. Каждая из твердых частиц этого облака содержала в себе распадающиеся радиоактивные элементы в количествах, примерно в 3—4 раза больших, чем в современных метеоритах. При этом каждая из частиц подвергалась ин-

тенсивному космическому облучению, под воздействием которого в ходе различных ядерных реакций образовывался гелий. Следовательно, формирование планетного тела Земли происходило из частиц, в той или иной мере обогащенных как радиоактивными элементами, так и гелием, и не учитывать этот первичный (относительно формирующейся планеты) гелий нельзя. Однако диффузия первичного гелия из еще неуплотнившегося тела планеты, а затем и дифференциация вещества планеты вследствие гравитационного уплотнения и разогрева исключили возможность длительного сохранения существенных количеств этого первичного гелия в недрах Земли.

По мнению Юри [Миллер, 1960], водород, гелий и другие легкие газы в основном улетучились, причем еще задолго до того, как Земля была сформирована как планета. Примерно того же мнения придерживается и Майн (1956), который отмечает: «Мало сомнений в том, что практически весь первичный гелий был потерян и что современный земной гелий — это результат ядерного распада в течение времени существования Земли».

В связи с изложенным можно заключить, что никакой достоверной количественной оценки первичного гелия в общем современном гелиевом балансе Земли не может быть дано. По-видимому, первичный гелий в современном гелиевом балансе может учитываться скорее теоретически, чем практически.

Основными положительными элементами современного гелиевого баланса являются радиогенный ( $He_{раг}$ ) и в меньшей мере космический гелий. К радиогенному относится гелий ядерных реакций и радиоактивного распада.

В связи с преобладающим значением доли  $\alpha$ -гелия в общем балансе гелия радиоактивного распада и ядерных реакций он с полным основанием может быть назван радиогенным.

К космическому ( $He_{косм}$ ) может быть отнесен гелий, поступающий в атмосферу Земли вместе с метеоритной пылью и космическими телами ( $He_{мет}$ ), с первичными космическими лучами ( $He_{лорп}$ ), а также образующийся в атмосфере под воздействием космического облучения, т. е. поступающий со вторичными космическими лучами ( $He_{втор}$ ).

Отнесение к космическому гелия, образующегося в атмосфере в результате взаимодействия земных элементов с космическими частицами, несколько условно, так как материнскими для него являются элементы Земли — например, азот, но своим возникновением он обязан все же космическому воздействию.

Последним членом общего генетического баланса гелия, причем его отрицательным членом является гелий, диссипировавший в космос ( $He_{дис}$ ). Он должен учитываться в связи с постоянной потерей гелия Землей.

В табл. 41 приведены ориентировочные данные о каждом из этих видов гелия. Основная масса образовавшегося гелия — это гелий радиогенный. На долю всех остальных источников гелия приходится лишь несколько тысячных долей процента.



Таблица 41

## Гелиевый баланс Земли

Элементы баланса	Основные составляющие элементов баланса	Гелий, см <sup>3</sup> /год
Первичный (He <sub>перв</sub> )	Первозданный гелий, прихваченный веществом Земли при формировании ее как планеты, а также первичный гелий, присутствующий в частицах протопланетного вещества Земли, из которых она сформировалась	Полностью утрачен в начальную стадию существования Земли как планеты
Радиоγενный (He <sub>рад</sub> )	Гелий, образующийся при α-распаде радиоактивных элементов в недрах Земли	+2,94 · 10 <sup>13</sup>
	Гелий, образующийся при различных ядерных реакциях в недрах (нейтронное расщепление лития и т. п.)	+5,88 · 10 <sup>8</sup>
	Гелий, образующийся в результате распада трития	+1,15 · 10 <sup>7</sup>
Космический (He <sub>косм</sub> )	Гелий, поступающий на Землю с метеоритной пылью и различными космическими телами	+2,74 · 10 <sup>8</sup>
	Гелий, поступающий в атмосферу Земли с первичными космическими лучами	+7,07 · 10 <sup>4</sup>
	Гелий, образующийся в атмосфере при вторичном космическом облучении (учтен только He <sup>4</sup> ; He <sup>3</sup> , образующийся при распаде трития, учтен выше)	+1,03 · 10 <sup>4</sup>
Диссипационный (He <sub>дис</sub> )	Гелий, диссипировавший в космос из экзосферы	-0,32 · 10 <sup>13</sup>
Итого . . . . .		+2,62 · 10 <sup>13</sup>

Как видно из таблицы, ежегодно Земля образует  $2,94 \cdot 10^{13}$  см<sup>3</sup> и теряет  $0,32 \cdot 10^{13}$  гелия, современный прирост запасов гелия составляет, таким образом,  $2,62 \cdot 10^{13}$  см<sup>3</sup>/год. Можно рассчитать общее количество гелия, которое смогла накопить Земля за 4,5 млрд. лет своего существования. Генерация гелия Землей в начальные этапы истории Земли превышала современные масштабы примерно в 2,5—3,5 раза в связи с большим количеством радиоактивных элементов, но одновременно с этим скорость потери гелия была значительно выше современной в связи с меньшей плотностью Земли, более высокими ее температурами и активными процессами дифференциации вещества Земли и его дегазации. Поэтому предположение о том,

что среднегодовой прирост запасов гелия не превышает  $3,5 \cdot 10^{13}$  см<sup>3</sup>/год в пределах общей точности расчетов, будет, по-видимому, относительно достоверным. В таком случае общие запасы гелия, накопленные Землей за время ее существования, составят  $15,7 \cdot 10^{22}$  см<sup>3</sup>, или  $1,45 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup> гелия на 1 см<sup>3</sup> общего объема Земли, что при средней плотности Земли  $5,52$  г/см<sup>3</sup> составит  $2,76 \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup>/г, или  $4,93 \times 10^{-9}$  г/г.

В соответствии с данными Равкама [1956] распространенность гелия в изверженных породах земной коры составляет  $0,003$  г/т, или  $3 \cdot 10^{-9}$  г/г, что почти полностью совпадает с рассчитанным нами количеством гелия в единице объема Земли — около  $5 \cdot 10^{-9}$  г/г.

## ГЕЛИЕНОСТЬ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ

§ 1. ВИДЫ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГЕЛИЯ  
И КЛАССИФИКАЦИИ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ  
ПО СТЕПЕНИ ИХ ГЕЛИЕНОСТИ

На Земле неизвестны процессы, приводящие к массовой генерации гелия на локальных участках в столь короткие интервалы времени, чтобы образующийся гелий не успел рассеяться и смешаться с другими газами, всегда присутствующими в недрах. Поэтому в свободном виде гелий в природе не встречается. Как правило, он является примесью к любым другим газам, причем, пожалуй, невозможно найти природную газовую смесь, совершенно лишенную гелия. Он присутствует повсеместно, хотя и в весьма различных концентрациях — от  $10^{-6}$  —  $10^{-5}$  до 20%\*.

По условиям нахождения в природе различаются следующие проявления гелия: 1) гелий, растворенный и окклюдированный в твердых породах; 2) гелий, растворенный в водах и нефтях; 3) гелий свободный, смешанный с газами атмосферы, а также с газами сухих газовых скоплений в недрах и газовых струй.

Степень гелиенасыщенности различных растворителей далеко не одинакова. Самая высокая гелиенасыщенность единицы объема растворителя отмечается в урановых минералах. В одном из образцов ториянита содержалось около  $20 \text{ см}^3$  гелия на  $1 \text{ см}^3$  минерала, причем это далеко не предельное содержание гелия, приходящееся на единицу объема породы.

Высвобождаясь из кристаллических решеток гелиеобразующих минералов, гелий поступает в поры, трещины, каверны и прочие полые пространства пород. Значительная разница в диффузионных свойствах твердых ( $D = 10^{-10} \text{ см}^2/\text{сек}$ ), жидких ( $D = 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$ ) сред и тем более газовых ( $D = 10^{-1} \text{ см}^2/\text{сек}$ ) затрудняет обратный возврат гелия в твердую среду, создавая условия для его постепенного накопления в поровых пространствах пород.

Гелий, поступающий в поровое пространство, растворяется в находящемся в них флюидах — в водах, нефтях и газах. Степень насыщенности гелием поровых флюидов весьма разнообразна и зависит от многих факторов, в частности от начального содержания гелия во флюиде, от интенсивности поступления его из пород, слагающих поровое пространство, а также от самих флюидов, содержащих растворенные в них радиоактивные элементы, от соотношения

масштабов притока и оттока гелия, мигрирующего сквозь осадочную толщу и т. д.

Предельное количество гелия, которое может быть накоплено поровым пространством, ограничивается его растворимостью в заполняющих поры флюидах, т. е. находится в зависимости от свойств растворителя и физико-химической обстановки, существующей в недрах. Для свободной газовой фазы оно практически не ограничено и определяется только количественными возможностями поступления гелия в поровое пространство и удержания его в нем, тогда как для нефтей и вод общее количество гелия ограничено растворимостью, причем предел возможной гелиенасыщенности нефтей выше, чем вод, в связи с большей растворимостью в них гелия. В соответствии с данными, приведенными в гл. II, растворимость гелия во флюидах изменяется в зависимости от температуры, давления, удельного веса и состава флюида в довольно широких пределах.

При атмосферном давлении и комнатной температуре растворимость гелия в нефтях разного состава примерно в 5—10 раз выше, чем в водах. При  $70\text{—}75^\circ \text{C}$  и давлении  $200 \text{ ат}$  растворимость гелия в воде составляет около  $1,8 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , а в одном из образцов пластовой нефти —  $10,6 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , т. е. примерно в 6 раз больше в нефти, чем в воде. В зависимости от состава и свойств нефти величина растворимости гелия меняется, но постоянно остается значительно выше его растворимости в воде. Как правило, абсолютные количества гелия, растворенные в подземных водах и нефтях, значительно меньше пределов их растворимости. Содержание гелия около 30—50 мл в 1 л воды, или 300—400 мл в 1 л нефти, — это уже высокое абсолютное содержание гелия на единицу объема растворителя в естественных условиях недр.

При решении различных вопросов баланса и динамики гелия в недрах следует использовать данные о его распределении, выраженные в единицах упругости. Однако при промышленной оценке качества гелиевого сырья, а следовательно, и при поисках гелия необходимо ориентироваться на данные по концентрациям гелия в составе природных газов, так как одни и те же концентрации гелия могут характеризоваться совершенно различными его упругостями в зависимости от давления, испытываемого залежью. Так, при концентрации гелия в составе газов свободной газовой залежи, равной 0,1%, его упругости при пластовых давлениях 50, 100 и 200 ат составят, соответственно, 0,05; 0,1 и 0,2 ат.

Основным заполнителем поровых пространств недр является вода, соответственно и основное количество гелия растворено в подземных водах, но наиболее высокие концентрации гелия возможны лишь в свободных газах, поэтому наибольший практический интерес с точки зрения поисков высокогелиеносных газов представляют залежи природных газов и в меньшей мере — газы, растворенные в нефтях.

Обработка имеющегося в нашем распоряжении большого количества фактического материала (около 10 тыс. анализов) показала, что

\* Здесь и далее концентрации указываются в объемных процентах.

по степени гелиености природные газы могут быть подразделены на газы низкой и пониженной гелиености —  $He < 0,025\%$ ; средней и повышенной —  $He$  от 0,025 до 1% и высокой гелиености —  $He \geq 1,0\%$ .

Более детальная градация природных газов по концентрациям в них гелия приведена в табл. 42. О степени распространенности тех или иных концентраций в природных газах можно судить по рис. 5.

Таблица 42

Классификация природных газов по степени их гелиености

Интервалы концентраций гелия, об. %	Степень гелиености	Возраст отложений
$< 0,005$ 0,005—0,009	Весьма низкая Низкая	Кайнозойский
0,010—0,024 0,025—0,049	Пониженная Средняя	Мезозойский
0,050—0,999 1,000—2,999 $\geq 3,000$	Повышенная Высокая Весьма высокая	Палеозойский

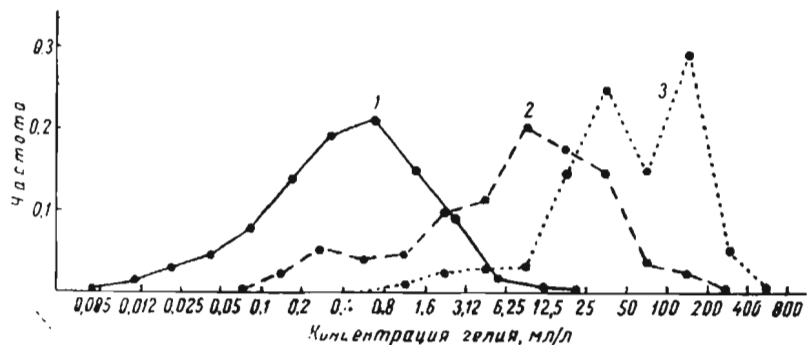


Рис. 5. Распределение гелия в поровом пространстве, занятом водой (1), нефтью (2) и газом (3).

Упругость гелия в природных газах для подавляющего числа залежей меняется в пределах 0,02—0,50 ат, составляя в среднем 0,1 ат. Характер распределения упругостей гелия в природных газах свободных газовых скоплений показан на рис. 6. В соответствии с данными статистической обработки фактического материала по степени упругости гелия в газах могут быть выделены газы с низкой и пониженной упругостью гелия  $\leq 0,100$  ат, средней и повышенной

ной — 0,100—1,500 ат и высокой —  $> 1,500$  ат. Классификация газов по степени упругости растворенного в них гелия приведена в табл. 43.

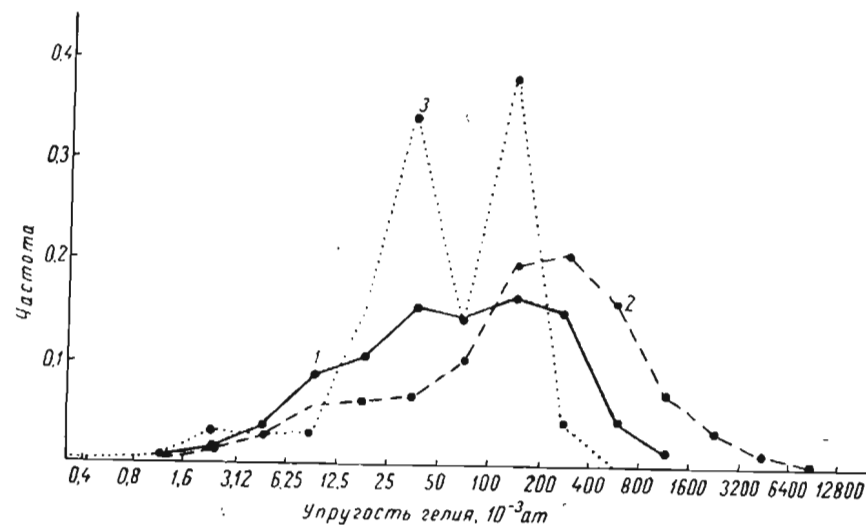


Рис. 6. Распределение упругостей гелия в воде (1), нефти (2) и газе (3).

Таблица 43

Классификация природных газов по степени упругости гелия

Интервалы упругостей гелия, ат	Степень упругости гелия в составе газов	Возраст отложений
$\leq 0,005$ 0,005—0,025	Весьма низкая Низкая	Кайнозойский
0,024—0,100	Пониженная	Кайнозойский и мезозойский
0,101—0,400 0,401—1,500 1,501—4,999 $\geq 5,000$	Средняя Повышенная Высокая Весьма высокая	Палеозойский

Уникальные по концентрациям гелия (7—10%) залежи свободных газовых скоплений с промышленными запасами обнаружены в США, на плато Колорадо, там же обнаружена и максимальная упругость гелия — 10—16 ат. Обычно же концентрации гелия в газах различных месторождений мира меняются в пределах 0,000—0,010% для газов кайнозойских отложений, 0,010—0,050% для мезозоя и 0,050—0,100% для газов палеозоя.

## § 2. ГЕЛИЕНОСТЬ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ СВОБОДНЫХ ГАЗОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Изучение гелиености природных газов свободных газовых скоплений производилось во многих странах мира как с точки зрения решения различных вопросов их геохимии, так и с целью обнаружения газовых месторождений, пригодных для промышленного извлечения гелия. Степень изученности гелиености природных газов в различных странах крайне неравномерна. В СССР, США и, возможно, в Канаде на гелий исследуются почти все вновь открываемые газовые месторождения, находящиеся в районах, перспективных на гелий. Относительно хорошо изучена гелиеность природных газов Японии, в несколько меньшей мере Западной Европы и совсем слабо на Южно-Американском, Африканском и Азиатском континентах (вне границ СССР и Японии).

Нет возможности в рамках данной работы привести в достаточно полном объеме фактический материал по гелиености природных газов мира, поэтому остановимся лишь на самой краткой характеристике гелиености газов отдельных нефтегазоносных бассейнов зарубежных стран.

### Америка

Основные нефтегазоносные провинции Северной Америки располагаются на территории Аляски, Канады и США. Нефтегазоносность Аляски связана с мезо-кайнозойскими отложениями, сведениями о гелиености этих газов мы не располагаем, но, по-видимому, она низкая и пониженная, в основном не более 0,025%.

На территории Канады газонефтяные месторождения сосредоточены в пределах Западно-Канадского бассейна и в меньшей мере — в Восточно-Канадском.

Западно-Канадский бассейн располагается на территории штатов: Британская Колумбия, Альберта, Саскачеван и Манитоба. Промышленная нефтегазоносность связана с известняками, доломитами и песчаниками девонского, миссисипского, триасового и мелового возрастов. Гелиеность природных газов Западно-Канадского бассейна меняется в широких пределах. Преимущественно это газы средней и повышенной гелиенасыщенности. Единичные месторождения имеют высокую гелиеность, превышающую 1%; газов с весьма высокой гелиеностью (более 3%) в Канаде не выявлено.

Наиболее полные сведения о гелиености природных газов Западно-Канадского бассейна приведена Хитчоном [Hitchon, 1963]. В соответствии с его данными большая часть газовых залежей Западной Канады содержит менее 0,05% гелия, и лишь три участка ее территории (своды Пис Ривер и Суитграсс и центральная часть Альберты) содержат газы с концентрацией гелия  $> 0,1\%$  (рис. 7).

Наиболее богатые по запасам гелия газовые месторождения Канады обнаружены в штате Саскачеван, на территории северной части Уиллстонского бассейна. Продуктивны сланцы, песчаники и алевроиты с прослоями известняков формации Дедвуд (верхний

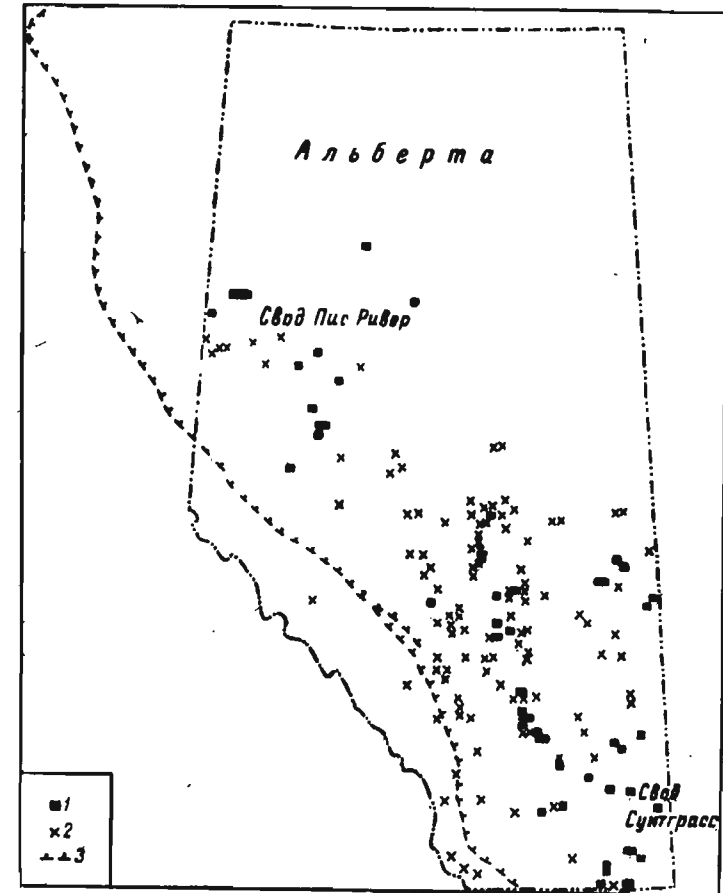


Рис. 7. Распределение концентрации гелия в природных газах штата Альберта, по Хитчону [Hitchon, 1963].

1 — концентрация гелия в природных газах выше 0,1%; 2 — то же, ниже 0,1%; 3 — восточная граница пояса Предгорий.

кембрий — нижний ордовик), перекрывающие кристаллический фундамент. Содержание гелия в азотных газах площади Эйкенс (Свифт-Каррент) — 1,90%, упругость — 3,6 ат, на площади Вуд Маунтин — 1,08—1,38% при упругости около 1,6 ат. Запасы гелия на месторождениях Вуд Маунтин и Эйкенс, составляющие примерно 14—28 млн. м<sup>3</sup>, достаточны для организации промышленной добычи

гелия. Перспективными на гелий в Саскачеване являются также площади Баттл-Крик (0,14—0,47%), Истевд и Браддок. Сведения о составе гелиеносных газов Саскачевана приведены в табл. 44.

Таблица 44

Химический состав (об. %) природных газов Уиллистонского бассейна (провинция Саскачеван) по данным Завадского [Sawatzky, 1960].

Месторождение	Горизонт	Глубина, *	Дата отпробования	СН <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> +1*	H <sub>2</sub>	СО <sub>2</sub>	Другие газы	He+Ne
Вильгельм	Дедвуд (См <sub>2</sub> —О <sub>1</sub> )	1920	1958	—	96,57	—	—	1,53	1,90
Вуд-Маунтин	См <sub>2</sub> —О <sub>1</sub>	1486	1960	—	96,35	—	—	2,57	1,08
То же	См <sub>2</sub> —О <sub>1</sub>	1486	1960	2,87	94,40	1,20	Следы	—	1,38
Баттл-Крик	Дюпероу (D <sub>3</sub> )	—	1952	—	13,5	—	81,7	5,66	0,14
То же	Даусон Бей (D <sub>2</sub> )	—	1952	—	95,16	—	—	4,47	0,47

\* Здесь и далее i — инертные газы.

Гелиеносность природных газов Восточной Канады изучалась еще в 1926 г. Элворси [Elworthy, 1926] в районе Юго-Западного Онтарио.

Все исследованные и\* газовые залежи вскрыты в отложениях силура и ордовика на глубинах 310—740 м. Встречаются повышенные концентрации гелия — 0,1—0,8%, чаще — 0,2—0,4%. Упругость гелия в среднем — 0,1 ат. Промышленного значения, с точки зрения добычи гелия, месторождения не имеют в связи с незначительными запасами.

На территории США обнаружены уникальные по концентрациям гелия залежи природных газов с промышленными запасами. Особенно выделяются район плато Колорадо, где гелиеносность газов достигает на отдельных месторождениях 7—10%, и район Мидконтинента, сосредоточивший в своих месторождениях основные запасы гелия не только США, но и всего капиталистического мира.

По гелиеносности природных газов США имеется обширная опубликованная литература, многие из сведений объединены и обработаны нами ранее [Якуцени, 1963], в связи с этим характеристика гелиеносности природных газов этой страны будет приведена в краткой форме.

Подробнее с данными о составе природных газов как Мидконтинента, так и в целом по США можно ознакомиться по бюллетеням Горного департамента США № 486 за 1951 г., № 576 за 1958 г. и информационному циркуляру № 8239 за 1964 г., в которых собраны сведения свыше чем о 5 тыс. анализах природных газов этой страны. Среди шести крупнейших нефтегазодобывающих провинций США — Западной (Калифорния), Скалистых гор и запада Великих Равнин,

Центральной, Южной, Юго-Восточной и Северо-Восточной — перспективными на гелий оказались лишь две провинции — Юго-Восточная и Западная, на территории всех остальных обнаружены месторождения гелиеносных газов.

Западная нефтегазосная провинция находится в пределах штата Калифорния, газовые месторождения располагаются в осадочных отложениях межгорных впадин системы Береговых хребтов.

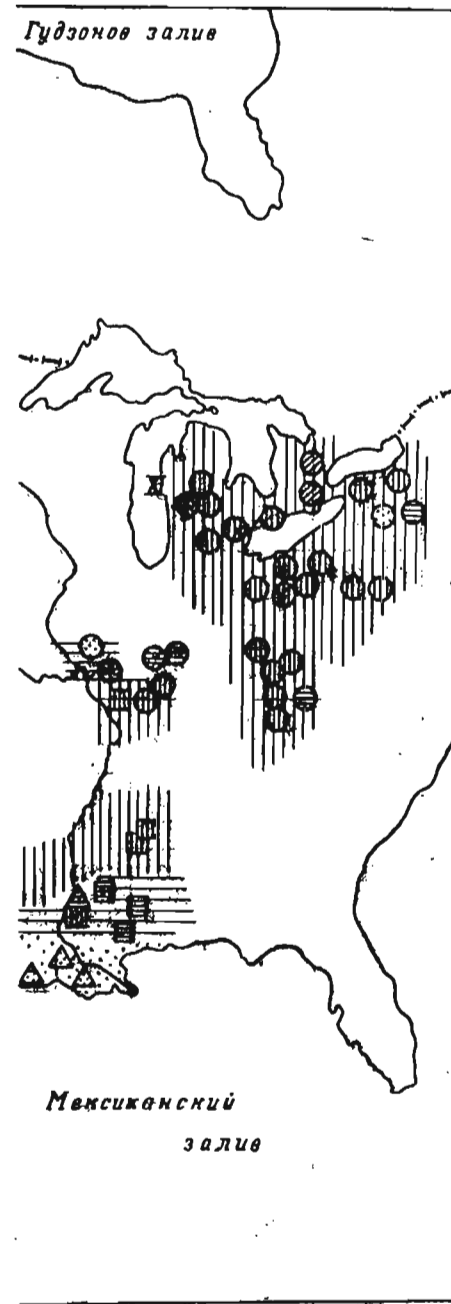
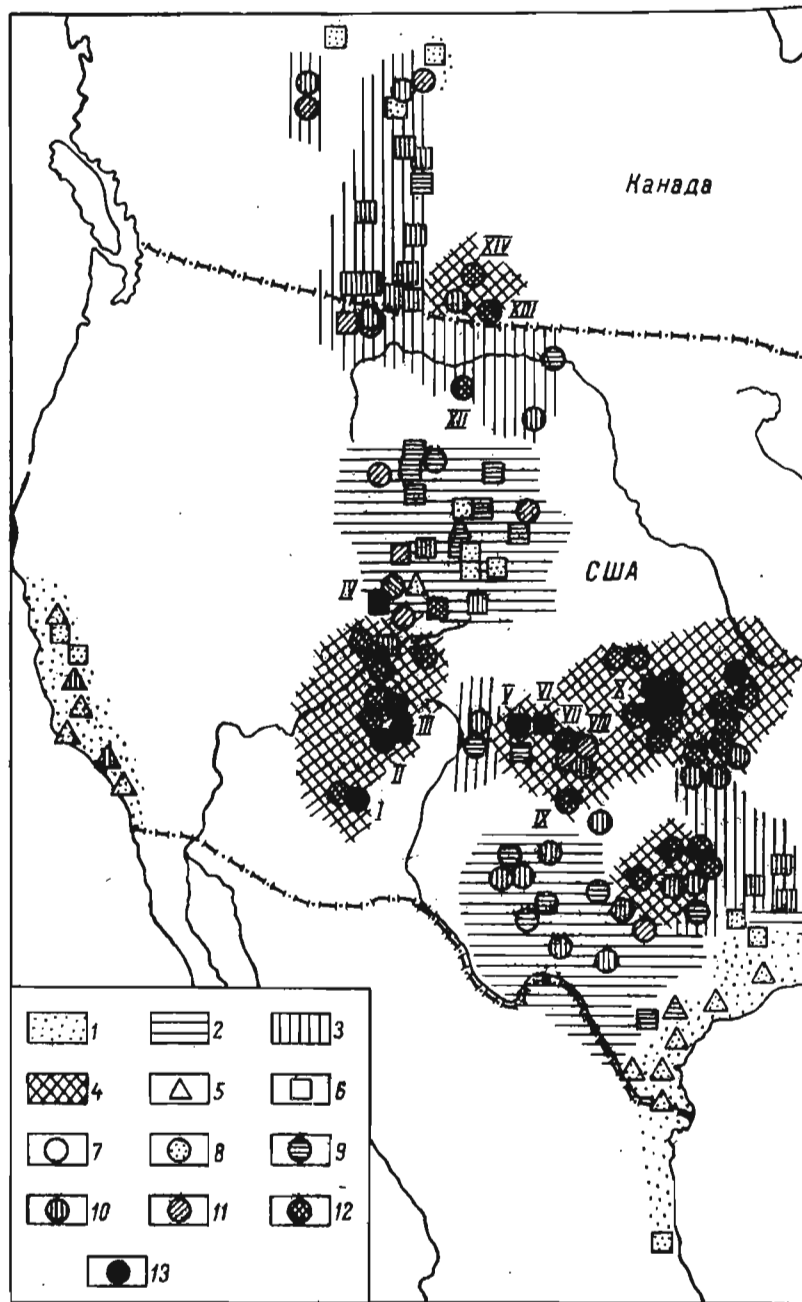
Фундамент калифорнийских бассейнов сложен главным образом гранитами и метаморфизованными юрскими породами. Продуктивны третичные и меловые отложения. Природные газы имеют углеводородный состав, азота в них обычно не более 2—3%, характерна низкая и пониженная гелиеносность газов. Обнаружены лишь единичные, небольшие по запасам газовые залежи с повышенным содержанием гелия — Филлмор (0,3%), Шафте (0,15%) и Кетлмен Хиллс (0,15%).

На территории обширной нефтегазосной провинции Скалистых гор и запада Великих Равнин, в районе плато Колорадо, обнаружен ряд месторождений азотных газов с весьма высокой гелиенасыщенностью — более 3%. Среди них месторождения Раттлснейк (7,7%), Хогбек (5—7%), Навайо-Чемберс (8—10%), характеризующиеся не только высоким качеством гелиевого сырья, но и значительными запасами газов. Наиболее богатые по степени гелиенасыщенности газы обнаружены главным образом в так называемом районе Четырех Углов, расположенном на стыке четырех штатов — Юта, Колорадо, Нью-Мексико и Аризона. Продуктивны здесь отложения триаса (формация Чинл), перми (песчаники Кокоино) и девона.

Повышенная гелиенасыщенность природных газов свойственна большинству нефтегазовых месторождений плато Колорадо, хотя наряду с высокогелиеносными газами в отложениях мезо-кайнозой здесь обнаружены также и залежи с низкими концентрациями гелия — менее 0,025%.

Северному нефтегазосному району этой провинции — зоне Скалистых Гор — не свойственна столь высокая гелиенасыщенность газов, как для южного района — плато Колорадо. Газовые залежи с высоким содержанием гелия, превышающим 1%, здесь относительно редки (Куутенай Доум, Ховад Коуле, Ланс Крик и др.), но в целом и для этого нефтегазосного района провинции характерна повышенная гелиеносность.

Центральная нефтегазосная провинция (Мидконтинент) является богатейшим по запасам гелия районом США. Подавляющему большинству месторождений Мидконтинента, в том числе и уникальному по запасам Пенхандл-Хьюготону, свойственна весьма повышенная гелиеносность углеводородных газов (0,3—0,6%). Многие месторождения характеризуются высокой гелиеносностью газов, превышающей 1%, среди них — Кейес (2,2%), Декстер (1,6%), Талога (1,1%) и другие, на отдельных месторождениях провинции обнаружена даже весьма высокая гелиеносность газов, превышающая 3% (Зап. Грит Бенд, Павнии Рокк и др.). В целом же степень гелиеносности газов Центральной нефтегазосной провинции



уступает месторождениям плато Колорадо, но промышленная ценность их как гелиевого сырья значительно выше.

Основное достоинство месторождений этого района — углеводородный состав газов и высокие запасы, позволяющие рентабельно вести попутную добычу гелия. Не случайно поэтому подавляющая часть гелиедобывающих заводов США расположена на территории Центральной нефтедобывающей провинции. Продуктивны здесь отложения палеозоя — от ордовика до перми включительно. Нескольким обособленным месторождениям по степени гелиеносности занимают газовые месторождения юга провинции. По мере продвижения на юг, к Мексиканскому заливу, на юге Оклахомы и севере Техаса начинают появляться газовые залежи с пониженным и даже низким содержанием гелия. Еще южнее, на территории Южной и Юго-Восточной нефтегазоносных провинций в пределах Центрального и

Рис. 8. Схематическая карта гелиеносности природных газов США и Канады.

Зоны распространения природных газов с концентрацией гелия (%): 1 < 0,03; 2 — 0,03—0,09; 3 — 0,10—0,99; 4 — > 1,00; 5 — месторождение или разведочная площадь с залежью газов в отложениях триасового возраста; 6 — то же, в мезозое; 7 — то же, в палеозое; содержание гелия (%) в природных газах месторождений: 8 < 0,03; 9 — 0,03—0,09; 10 — 0,10—0,49; 11 — 0,50—0,99; 12 — 1,00—2,99; 13 — > 3; месторождения: I — Навайо-Чемберс, II — Раттлснейк, III — Хогбен, IV — Харлей Доум, V — Модель Доум, VI — Ред Рок, VII — Кейс, VIII — Хьюгоном-Пенкавдл, IX — Клифсайл, X — Павлин Рок, XI — Биг Прайрс, XII — Ховард Коулс, XIII — Вуд Маунтин, XIV — см. Вильгельм, подающая газ на гелиевый завод Сифт Каррент.

Таблица 45

## Химический состав гелиеносных природных газов США

Штат	Округ, месторождение	Свободн. дебит газа, тыс. м <sup>3</sup> /сутки	Возраст	Глубина, м	Дата опробования	СН <sub>4</sub>	Состав газа, об. %									Источник сведений	
							ТУ	N <sub>2</sub> +i	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	Ar	He+Ne		
Калифорния	Кэн, Шаффе Вентура, Филлмор	85	N <sub>2</sub> Tr	1315	1954	99,3											Boone [1958] Anderson, Hinson [1951]
		43		183	1918	—	0,4	0,1 *	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,15	
Вайоминг	Свитвоте, Южн. Бакстер Бэй-син	1846	Cr <sub>2</sub>	885	1923	75,6											То же
Монтана	Мюсселгиелл, Ховад Коуле Либерти, Утопия	10	C <sub>mis</sub> —	1524	1948	3,0											Boone [1958] То же
		123		1079	1946	14,3	4,0	69,2	0,3	—	23,5	—	—	—	1,16	0,87	
Нью-Мексико	Сан-Хуан, Хогбек	199	C <sub>mis</sub> C <sub>mis</sub> T C <sub>mis</sub> C <sub>mis</sub> D D C <sub>mis</sub>	1879	1952	29,1											Boone [1958] То же Anderson, Hinson [1951] Boone [1958] То же Anderson, Hinson [1951]
	То же	426		2134	1952	5,8	6,1	54,6 *	0,0	Следы	2,0	0,0	0,0	0,6	7,17	7,17	
	» , Битлебито	—		297	1943	14,4	7,8	60,5 *	Следы	0,0	20,3	—	—	0,5	5,06	5,06	
	» , Тейбл Мега	—		2286	1951	5,9	6,4	78,9	0,0	—	0,3	—	—	—	8,92	8,92	
	» , Раттлснейк	937		2118	1943	14,2	1,6	83,8 *	Следы	0,1	1,4	0,0	0,0	0,7	5,7	5,7	
	» , »	213		2134	1954	10,6	2,8	86,2	0,0	—	2,8	—	—	—	7,6	7,6	
	» , Тосито	—		2035	1943	2,6	2,6	76,6 *	Следы	Следы	1,9	0,0	0,0	0,9	7,81	7,81	
Аризона	Навайо, Навайо-Чемберс Бята-Пик	15—720	P—T P—T	300	1960	0,1											Дин, Лауф, [1961] То же
		—		—	1960	—	—	90,0	—	—	0,8	—	—	0,6	8—10	6	
Юта	Эмери, Вудсайд Гранд, Харлей Доум	256	P J <sub>3</sub>	951	1924	0,0											Anderson, Hinson [1951] То же
		49		262	1931	5,1	2,1	68,2	1,3	—	28,4	—	—	—	1,33	7,02	
Колорадо	Лос-Анимас, Ред-Рок Тб же, Модель Доум	—	J+Cr P	—	—	—											B. B. Белоусов [1935] Anderson, Hinson [1951]
30	334	1929	0,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7,7	8,34			
Оклахома	Симарон, Кейес То же, Стэгис	3039	C <sub>2+3</sub> C <sub>2+3</sub>	1431	1954	64,3											Boone [1958] То же
		1538		1390	1953	60,8	6,2	26,6	0,0	Следы	0,7	0,0	0,0	0,1	2,19	2,25	
Канзас	Батон, Анрух	1150	O — O P P	1096	1947	79,4											Anderson, Hinson [1951] Boone [1958] То же Anderson, Hinson [1951] То же
	Батон, Зап. Грит Бенд	103		1074	1952	49,5	10,5	9,5	0,1	—	0,3	—	—	—	1,28	3,82	
	Павнии, Павнии Рок	—		1166	1953	36,6	10,2	35,8 *	0,1	0,0	0,4	—	—	0,2	3,82	3,82	
	Финей, Хьюгетон	156		772	1932	65,7	6,2	52,3 *	0,0	0,0	0,7	—	—	0,2	4,06	4,06	
	Хаскель, Хьюгетон	435		793	1936	70,0	17,1	16,8	0,3	—	0,1	—	—	—	0,47	0,47	
							12,9	16,7	0,3	—	0,1	—	—	—	0,48	0,48	
Техас	Шерман, Хьюгетон	1521	— — P <sub>1</sub> P C <sub>2+3</sub> P	—	1952	68,8											Boone [1958] То же » » Anderson, Hinson [1951] Boone [1958]
	Муэ, Пенхэндл	2473		869	1953	75,0	12,3	17,5 *	Следы	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,83	0,83	
	Хатлей, »	2215		887	1951	71,4	14,2	9,8	0,0	Следы	0,5	0,0	0,0	0,1	0,41	0,41	
	Потте, »	3862		799	1955	73,0	8,7	18,5 *	0,1	0,0	0,3	—	—	0,1	1,07	1,07	
	Клей, Петролия	114		513	1920	71,0	10,6	15,0	Следы	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,91	0,91	
	Потте, Клифсайд	767		1011	1943	65,6	0,0	27,9	1,0	—	0,0	—	—	—	1,24	1,24	
							7,3	25,1 *	0,0	0,1	0,4	0,0	0,0	0,1	1,79	1,79	
Мичиган	Клар, Зап. Гамильтон Ньюэйго, Биг Прайрис	256	C <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	448	1952	71,7											Boone [1958] Anderson, Hinson [1951]
		130		314	1944	85,5	8,5	19,1	Следы	0,0	0,1	0,0	—	Следы	0,70	1,11	
Индиана	Спенсе, Роккпот	339	C <sub>1</sub>	265	1940	91,0											То же
Иллинойс	Вашигтон, Сев. Дибойс	435	—	361	1947	88,3											

\* Содержание азота без инертных определено на масс-спектрометре.

Южного Техаса, Юго-Восточного Нью-Мексико, Луизианы, Южного Арканзаса, Миссисипи и Алабамы, гелиеиность газов, как правило, низкая для отложений кайнозоя, незначительно повышенная в меловых отложениях и повышенная в палеозое. Чем ближе к Мексиканскому заливу, чем моложе газомещающие отложения и больше мощность осадочной толщи, тем ниже содержание гелия в газах.

Природным газам Северо-Восточной нефтегазонасной провинции, приуроченным к отложениям палеозоя, свойственна повышенная гелиеиность. Большая часть месторождений провинции содержит в составе преимущественно углеводородных газов 0,1—0,3% гелия. Наиболее гелиенасыщенными являются газы месторождений Мичиганского бассейна, концентрация гелия в них нередко составляет 0,3—0,5%. Схематическая карта гелиеиности природных газов США приведена на рис. 8, а важнейшие сведения о составе гелиеиных газов США — в табл. 45.

Для природных газов нефтегазонасных провинций Мексики и Центральной Америки, вскрытых в отложениях мезо-кайнозоя, характерна, по-видимому, преимущественно низкая гелиеиность. Данными о гелиеиности природных газов этих районов мы не располагаем, но можно предположить, что гелия в них, как правило, менее 0,25%, чаще всего 0,001—0,005%. Сведения о гелиеиности природных газов Южной Америки крайне ограничены, имеются лишь данные Корти [Szelenyi, 1941] по Аргентине, где содержание гелия по опробованным углеводородным месторождениям изменялось в пределах 0,006—0,036% (табл. 46).

Таблица 46  
Химический состав (об. %) природных газов  
Аргентины, по данным Корти [Szelenyi, 1941]

Номер скв.	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	He+Ne
1	90,2	2,4	0,2	0,012
2	90,7	4,9	—	0,013
3	87,6	6,6	—	0,013
9	62,7	29	—	0,036
11	95	0,4	2,1	0,006

## Африка

Имеющиеся сведения о гелиеиности природных газов Африки ограничиваются указанием о наличии месторождения гелиеиных газов Ин-Салах, расположенном на юге Сахарского бассейна в Алжире, без данных о его гелиеиности, а также о содержании гелия в газах месторождения Эвандар, расположенном на территории ЮАР, в 50 км восточнее г. Спрингс.

Газовые залежи месторождения Ин-Салах, приуроченные к отложениям девона и ордовика, вскрыты на глубине 1,2—2,9 тыс. м,

запасы газа составляют 13 млрд. м<sup>3</sup>. Отмечается, что газ содержит значительное количество гелия (Быховер, 1963). Состав газа метановый, имеются также и тяжелые углеводороды. Содержание гелия в газах месторождения Ин-Салах может быть оценено по данным Рида [Oilweek, 1965] равным 0,2—0,3%. Рид указывает эту концентрацию для алжирских газов, отмечая их высокую гелиеиность.

Природный газ на месторождении Эвандар содержит от сотых долей процента до 3,2% гелия, в среднем 0,61%. Газ по составу метановый, азота около 3%. Газ вскрыт в отложениях Миддл Экка (верхний карбон — верхняя пермь) при поисковом бурении на золото [Hugo, 1964], запасы крайне невелики, промышленного значения месторождение не имеет.

Газы месторождения во многом сходны с рудничными газами золото-уранового месторождения Витватерсранд (см. ниже), только имеют более низкие концентрации гелия и меньшие дебиты. Сомнительно, что оно может быть отнесено к разряду действительно газовых месторождений, хотя и носит такое название. Схема расположения указанных месторождений вместе с другими пунктами гелиевых газопроявлений в Африке приведена на рис. 9.

## Европа

Гелиеиность природных газов месторождений зарубежной Европы, как правило, незначительна, хотя и встречены отдельные малодобитные газопроявления с повышенной гелиеиностью. Наибольший промышленный интерес, с точки зрения добычи гелия, представляет нидерландское газовое месторождение Слохтерен (Гронингем), содержащее при общих запасах газа около 1,1 триллиона м<sup>3</sup> повышенное количество гелия — до 0,06%. В отложениях палеозоя зарубежных стран Европы имеются газовые залежи и с более высоким содержанием гелия — до 0,08% и выше, но запасы их незначительны. Ниже приводятся данные о содержании гелия в природных газах некоторых стран Западной Европы.

На территории Северо-Европейского бассейна, в пределах ФРГ, содержание гелия в залежах природных газов изменяется от тысячных до сотых долей процента (табл. 47). На крупнейшем газовом месторождении ФРГ Реден углеводородные газы, вскрытые в отложениях Главного доломита цехштейна, содержат всего 0,03% гелия, такое же количество гелия (0,03—0,04%) содержится и в газах других месторождений междуречья Везера и Эмса.

В северной части бассейна, близ Гамбурга, на месторождении Нейенгамм содержится 0,013—0,016% гелия. Газ вскрыт в олигоценых септариевых глинах на глубине 250 м. Южнее Нейенгамма, в Олдерхауэне, также в палеоген-неогеновых отложениях, но на глубине 1000 м вскрыт газ с содержанием гелия 0,011%. Запасы газа на обоих месторождениях незначительны.

На западе бассейна, в пределах Нидерландов, в районе Гронингем, на уже упомянутом нами месторождении Слохтерен газы,



Рис. 9. Гелиеносность природных газов Центральной и Южной Африки.

1 — источники подземных вод со спонтанно выделяющимися гелиеносными газами; 2 — рудничные гелиегазопроявления на золоторудном месторождении Витватерсранд; 3 — газовые месторождения; 4 — зоны выхода на поверхность пород докембрийского фундамента; 5 — сбросы и резкие тектонические нарушения. Цифрами рядом с источниками газа указана концентрация гелия.

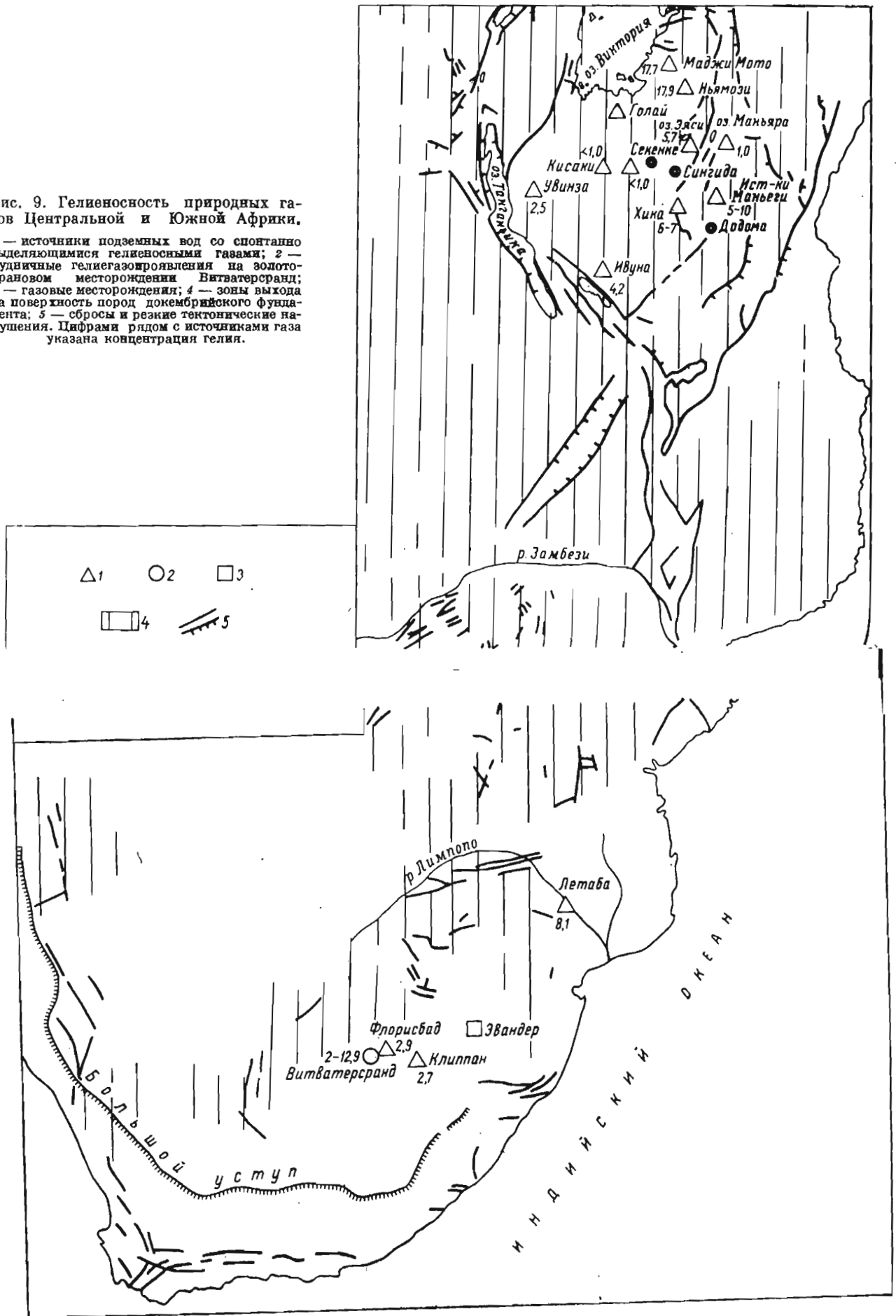


Таблица 47

## Химический состав природных газов (об. %) стран Европы

Страна	Месторождение	Возраст	Глубина, м	СН <sub>4</sub>	ТУ		N <sub>2</sub> +1	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	Ar	He+Ne	Источник сведений
Франция	Нефтегазовое, Пешельбронн, скв. 2	Pg <sub>3</sub>	—	98,98	—		1,0	—	—	Следы	—	0,017	0,003	Szelenyi [1941]
	То же, скв. 218	Pg <sub>3</sub>	—	98,1	—		1,36	—	—	0,51	—	0,019	0,004	То же
	» , скв. 220	Pg <sub>3</sub>	200	—	—		6,0	—	—	—	—	—	0,0063	В. В. Белоусов [1934]
	» , скв. 220	Cr	1000	5,65	—		46,17	0,1	—	47,75	—	—	0,38	А. И. Лукашук [1933]
	Лескен (деп. Нор)	—	—	—	—		97,78	—	—	0,97	—	0,350	0,924	Szelenyi [1941]
Нидерланды	Газовое, Гронингем (Слохтерен)	P <sub>2</sub>	3000	80—82	3,45		13,7—15,5	—	—	0,8—1,0	—	—	0,03—0,06	Hedemann [1963]
ФРГ	Газовое, Реден	P <sub>2</sub>	—	83,12	0,65		7,16	—	—	9,04	—	—	0,03	Hedemann [1963]
	То же	P <sub>2</sub>	—	80,2	0,32		8,0	—	—	11,5	—	—	0,04	То же
	Газовое, Нейенгамм	Pg—N	250	93,80	1,18		3,21	0,5	1,15	0,16	—	0,05	0,013	Kauter [1962]
	То же	Pg—N	250	76,7	—		3,3	—	—	—	—	0,037	0,016	А. И. Лукашук [1933]
	Газовое, Олдерхаузен	Pg—N	1000	50,10	—		45,0	4,0	—	0,20	—	0,7	0,011	Kauter [1962]
ГДР	Газовое, Мюльхаузен	P <sub>2</sub>	—	48,4	4,7		45,1	—	0,02	0,6	—	—	0,1	Сварский (1963)
	То же, Лангензальц	P <sub>2</sub>	—	50,2	21,7		27,2	—	0,01	Следы	—	—	0,05	То же
	Угледородное, Грамцов	—	—	—	—		97,2	—	—	1,8	—	—	0,1	Szelenyi [1941]
Чехословакия	Угледородное, Ратишковиц	Pg—N	300	—	—		—	—	—	—	0,026	0,0039	А. И. Лукашук [1933]	
Австрия	Газовое, Вельс	Pg—N	—	—	—		—	—	—	—	—	—	0,009	Szelenyi [1941]
Румыния	Газовое, Сармашел	Pg—N	302	99,12	—		0,73	0,15	—	—	—	—	0,001	А. И. Лукашук [1933]
	То же, Медиаш	»	—	—	—		—	—	—	—	0,023	—	0,0028	То же
Венгрия	Газовое, Михайи, окр. Шопрон	Pz—Kz	—	1,0	—		—	—	—	95,6	—	—	0,0023	Гардеску (1935)
Болгария	Газоконденсатное, Чиренское, скв. 1-Р	T <sub>2</sub>	1975—2040	90,4	3,62		5,7	—	—	0,022	—	0,006	0,024	Мандев (1965)
Швеция	Газопроявление Гетстаасен, о. Эланд	C <sub>2-3</sub>	—	46,3	0,0		47,7	—	1,8	2,5	0,0	0,52	1,20	И. Н. Яницкий (1966)
	То же, Сандвик, о. Эланд	»	—	74,3	0,5		23,4	—	0,0	0,2	1,1	0,3	0,140	То же
	» , Соллиден, о. Эланд	»	—	82,0	0,0		11,8	—	4,9	0,0	0,0	—	0,850	»

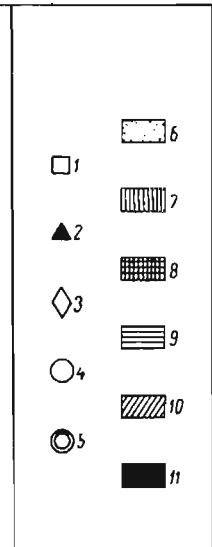
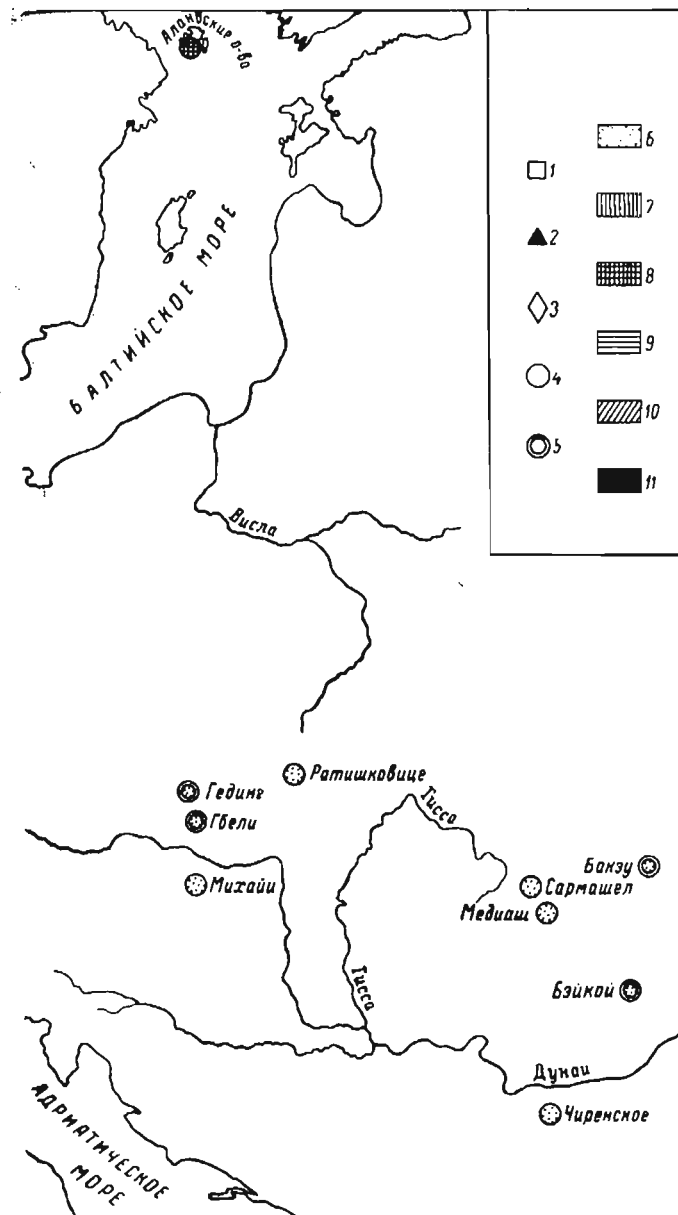
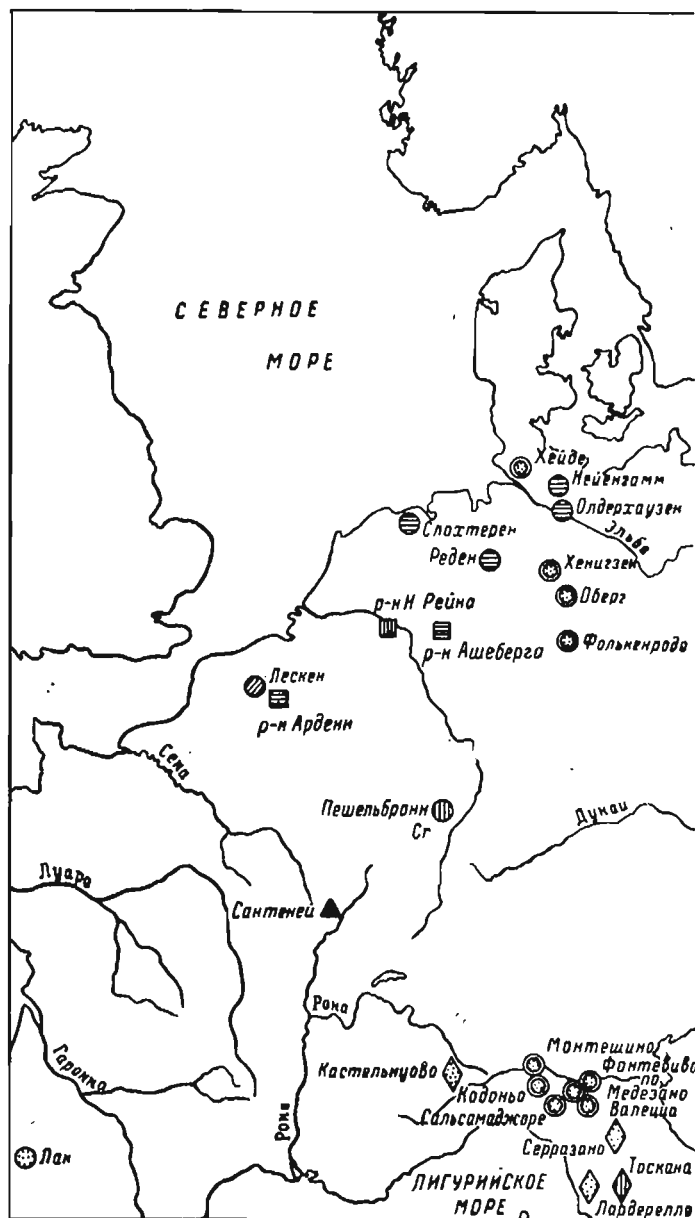


Рис. 10. Гелиеность природных

1 — газопрооявления на угольных шахтах; 2 — высокогелиеносное спон  
3 — вулканические газопрооявления Италии; 4 — газовые месторождения  
жание гелия (%): 6 — < 0,03; 7 — 0,03—0,09; 8 — 0,10—0,49;

газов Европы (без СССР).

тавное проявление из источника подземных вод Сантений (He ~ 10%);  
■ свободные газопрооявления; 5 — нефтяные месторождения; содер-  
9 — 0,50—0,89; 10 — 1,00—3,00; 11 — > 3,0.

8\*

содержащие 0,03—0,06% гелия, вскрыты на глубине около 3 тыс. м. Характерно высокое содержание азота — 14—15%. Продуктивные пермские отложения пехштейна, по данным отдельных геологов [Hedemann, 1963], газ поступает из отложений верхнего карбона.

В центральной части Северо-Европейского бассейна, на территории ГДР, повышенное содержание гелия (0,1%) обнаружено в азотных газах, вскрытых на структуре Грамцов, в восточной части Мекленбурга. Сведениями о содержании гелия на месторождении Штааков, под Берлином, мы не располагаем, но, судя по высокому содержанию азота в его составе (26,5%), можно предположить, что гелиеносность пермских газов этого месторождения будет несколько повышенная.

Газовые месторождения Мюльхаузен и Лангенвальц, обнаруженные на юге ГДР, в пределах Тюрингского бассейна, в отложениях пехштейна содержат соответственно 0,1 и 0,05% гелия. Запасы газа на этих месторождениях невелики — 210 и 400 млн. м<sup>3</sup>. Характерно высокое содержание азота — 45 и 27% (см. табл. 53).

Во Франции основные промышленные скопления газа сосредоточены на востоке — в пределах Рейнского грабена и на юго-западе — в Аквитанском бассейне. В Рейнском грабене наиболее значительным по запасам является месторождение Пешельбронн. Метановый газ, полученный с глубины 200 м из олигоценовых мергелей и известняков, содержал 6% азота и 0,006% гелия. Из меловых отложений, вскрытых там же на глубине до 1000 м, было получено промышленное проявление углекислого газа, содержащего 46% азота и 0,38% гелия.

Газ крупнейшего во Франции газового месторождения Лак, расположенного в Аквитанском бассейне, практически не содержит ни гелия, ни азота. По составу — это углеводородный газ с высоким содержанием сероводорода (15,3%) и углекислоты (9,7%). Продуктивны отложения верхней юры и нижнего мела.

Сведениями о гелиеносности природных газов Польши мы не располагаем. Возможно, что газы нефтегазовых месторождений Новая Соль и Отын, вскрытые в отложениях Главного доломита пехштейна (верхняя пермь), характеризуются высоким содержанием азота (33 и 60% соответственно), будут иметь и повышенное содержание гелия. Для газов азотно-углеводородного состава, обнаруженных в отложениях кембрия на о. Эланд (Швеция), характерна весьма повышенная и высокая гелиеносность — 0,8—1,4%.

Гелиеносность природных газов Чехословакии и Австрии, вскрытых в отложениях мезо-кайнозоя, не превышает обычно 0,01%. Столь же незначительно содержание гелия и в третичных газах Паннонского бассейна, вскрытых на территории Венгрии и Югославии [Szelenyi, 1941], а также Трансильванского бассейна Румынии.

Среди газовых месторождений балканских стран относительно повышенной гелиеносностью (0,024%) отличаются лишь газы Чи-

ренского газоконденсатного месторождения, приуроченные к известнякам и доломитам среднего триаса. Тысячные доли процента гелия в составе газов характерны для третичных газовых месторождений Италии.

Таким образом, в целом для газовых месторождений стран Западной Европы свойственна средняя и повышенная концентрация газов, вскрытых в северных ее районах, в отложениях палеозоя, и низкая концентрация гелия на мезо-кайнозойских месторождениях юга континента, прилегающего к альпийской зоне.

Сведения о составе природных газов отдельных месторождений Европы приведены в табл. 47, схематическая карта гелиеносности ее газов — на рис. 10.

### Азия, Океания и Австралия

Сведения о гелиеносности природных газов зарубежных стран Азии крайне ограничены. Специальные работы по изучению гелиеносности газов проводились только в Бирме и в Японии, имеются также отдельные данные о гелиеносности природных газов Афганистана, Западного Пакистана и Китая.

В Афганистане концентрация гелия в газах меловых отложений составляет 0,012—0,013%. В Западном Пакистане гелиеносность газов изучена в районе Суинского газового бассейна на месторождениях Суй, Зин и Джакобабад. Продуктивны известняки эоплена, содержание гелия в газах меняется в пределах 0,01—0,05%, наибольшим оно является в газах месторождения Джакобабад, характеризующихся одновременно и высоким содержанием азота — до 38%.

Природные газы меловых и юрских отложений Джучгарской впадины в Китае содержат от 0,001 до 0,009% гелия, в тех же пределах (0,004—0,006%) изменяется и содержание гелия в природных газах третичных отложений о. Тайвань.

Исследование гелиеносности третичных газов Бирмы, выполненное в 1931 г. Барбером [Barber, 1931], показало, что содержание гелия в них не превышает 0,003—0,007%. Столь же незначительная концентрация гелия (0,003%) выявлена и в газах третичных отложений о-вов Суматра и Ява.

Наиболее тщательному исследованию на содержание гелия подверглись природные газы Японии, однако выполненные работы остались безрезультатными с промышленной точки зрения: все опробованные свободные газопроявления из отложений третичного возраста имели низкое содержание гелия в составе газов — 0,000—0,007% и лишь по отдельным месторождениям — до 0,018% [Dobbin, 1935].

Сведения о гелиеносности природных газов Австралии ограничиваются единственным анализом с определением гелия, выполненным для месторождения Рома (Квинсленд). Газ мезозойских отложений на этом месторождении содержал 0,04% гелия.

Таблица 48

Химический состав природных газов (об. %) Азии (без СССР), Австралии и Океании

Страна	Месторождение	Возраст горизонта	Глубина, м	CH <sub>4</sub>	TV	N <sub>2</sub> +I
Афганистан	Газовое, Ходжа-Гугердаг, скв. 6	Cr	—	97,4	0,78	1,2
	Газовое, Естым-Таг, скв. 7.	Cr	—	97,3	0,79	1,2
Бирма	Газовое, Пьяйс	Tr	770	88,1	2,6	8,0
Западный Пакистан	Газовое, Суи	Pg <sub>2</sub>	1220	90,1	1,31	3,5
	То же, Уч	Pg <sub>2</sub>	—	27,0	1,3	24,8
	» , Зин	Pg <sub>2</sub>	1100	47,0	1,4	9,4
	» , Джакобабад	Pg <sub>2</sub>	1000	25,0	1,1	38,0
О. Тайвань	Углеводородные, Кинсуи	Tr	520	96,98	—	1,76
	То же, Сеугиурю	Tr	—	97,31	—	1,54
	» , Рокудиуки	Tr	—	95,88	—	3,1
Япония	Район Синмате, Митукэ	N <sub>1</sub>	905	90,76	0,35	7,68
Австралия	Газовое, Рома	Mz	1129	87,20	8,99	3,49
Новая Зеландия	Северный остров					
	Углеводородное, Ваймата	—	—	98,0	—	—
	То же, Морер	—	—	92,4	—	—
	» , Вебер	—	—	95,0	—	2,2
	Южный остров					
	Углеводородное, Ханмер	—	—	96,1	—	3,5
То же, Котука	—	—	11	—	25,5	
» , Котука	—	—	13,4	—	1,4	

Гелиеность природных газов Новой Зеландии изучалась еще в 1920 г. Мак-Леннаном [McLennan, 1920]. Нефтепромысленные газопрооявления этого района содержали в составе газов от 0,002 до 0,12% гелия, наиболее высокие концентрации гелия обнаружены в газо-водяных источниках и, по-видимому, характеризуют гелиеность спонтанных газов.

Данные о составе газов отдельных месторождений этих континентов приведены в табл. 48.

Австралии и Океании

O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	Ar	He+Ne	Источник сведений
—	—	0,6	—	—	0,004	0,012	А. К. Карпова (1964)
—	—	0,7	—	—	0,005	0,013	То же
0,4	—	0,3	0,6	—	—	0,0029	Barber [1935]
—	—	4,5	—	—	—	0,02	Тейнш (1960)
—	—	46,4	—	—	—	< 0,05	То же
—	—	42,65	—	—	—	0,01	»
—	—	37,0	—	—	—	0,05	»
0,22	—	0,91	0,13	—	—	0,004	Szelenyi [1941]
0,11	—	1,04	—	—	—	0,005	То же
0	—	0,96	0,04	—	—	0,006	»
0,26	—	0,77	0,18	—	—	0,002	А. И. Лукашук [1933]
—	—	—	—	—	—	0,04	Воолнаух (1934)
—	—	2,4	—	—	—	0,097	Szelenyi [1941]
—	—	—	—	—	—	0,031	То же
—	—	2,8	—	—	—	0,004	McLennan [1920]
—	—	—	—	—	—	0,071	То же
6,5	—	5,7	—	—	—	0,002	»
—	—	84,0	—	—	—	0,031	»

### § 3. ГЕЛИЕНОСТЬ ГАЗОВ, РАСТВОРЕННЫХ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ И НЕФТЯХ

Гелиеность газов, растворенных в нефтях и водах, значительно ниже, чем в свободных газовых залежах. Однако именно с водными источниками связаны все известные максимальные концентрации гелия, обнаруженные в природных газовых смесях.

При поступлении подземных вод из глубоких недр на поверхность в результате спада давлений и температур спонтанно выделяются

газы, резко обогащенные наименее растворимыми компонентами, в частности азотом, гелием и другими инертными газами. Так появляются источники спонтанных газов с крайне высокими концентрациями гелия в их составе, достигающими 20%.

Во Франции источник Сантены выделяет газ, содержащий 10% гелия; в Африке в горячих источниках Танзании обнаружена максимальная, зарегистрированная по современным данным, гелиеисодержательность природных газовых смесей — 17,9% при общем азотном составе. Много аналогичных источников спонтанных газов с высокой гелиеисодержательностью обнаружено на территории СССР, по-видимому, имеются они и в других странах мира.

Промышленного значения эти источники обычно не имеют в связи с низкими дебитами газа, но их геохимическое и поисковое значение крайне велико, так как они могут свидетельствовать об общей высокой гелиеисодержательности подземных флюидов и соответственно тех газовых залежей, которые могут быть обнаружены в районах их распространения.

Высокая гелиеисодержательность растворенных газов обнаруживается иногда при дифференциальном дегазировании нефтей, особенно в трапах высокого давления. Выходящая после первой ступени снижения давления газовая смесь резко обогащается гелием вместе со всеми остальными наименее растворимыми компонентами смеси, выделяющимися из нефти в первую очередь.

Такие данные свидетельствуют не столько о высокой гелиеисодержательности природных газов, растворенных в подземных условиях, сколько о происходящих в природе процессах дифференциального дегазирования, как естественных — в недрах, при миграции флюидов или на поверхности при спонтанном выделении газов в водных источниках, так и искусственных, возникающих в верхней части ствола скважины, вскрывающей глубоко погруженный флюид (нефть или пластовые воды). Обычно же величина гелиеисодержательности пластовых вод и нефтей, выраженная в абсолютных количествах, не высока.

Степень изученности гелиеисодержательности газов, растворенных в пластовых условиях в нефтях и водах, значительно ниже, чем свободных. Эти сведения имеются главным образом только по СССР. На рис. 5 приведены данные о распределении концентраций гелия (выраженных в миллиметрах на литр) в пластовых водах, нефтях и для сопоставления в газах.

Мы уже отмечали, что этот график хорошо иллюстрирует распределение гелия в различных флюидах, дополнительно можно отметить, что он позволяет также наметить средние величины концентраций, характеризующиеся наибольшей частотой распространения: для пластовой воды это 0,6 мл/л, для нефти — около 7 мл/л, а для газа в изученной части недр — по степени частоты отмечаются два пика концентраций — один из них соответствует примерно 35 мл/л (отложения мезозоя), а другой — 200 мл/л (палеозой).

Распределение упругостей гелия в пластовых водах и нефтях иллюстрируется графиком, приведенным на рис. 6. Характерно,

что нефтям свойственна более высокая упругость гелия, чем пластовым водам. Это кумулятивное свойство нефтей для гелия может действительно иметь место в природе, но может быть вызвано и систематической ошибкой, допущенной при обработке результатов анализов, обусловленной недостаточной изученностью растворимости гелия в нефтях.

Выше отмечалось, что максимальная гелиеисодержательность природной газовой смеси, спонтанно выделившейся из подземных вод, обнаружена на территории Танзании в Африке.

Исследование горячих источников этого района было выполнено с целью выяснения возможности промышленной добычи гелия. Существенного увеличения притока гелия получить не удалось даже при дополнительном разбуривании, но результаты исследований позволили собрать интересный в геохимическом отношении материал.

Спонтанное выделение азотных газов из горячих источников подземных вод, содержащих свыше 3% гелия, было обнаружено в районе Центральной Рифтовой долины и Озерной провинции. Всего известно около 12 различных мест с высоким гелиеисодержательным, расположенных северо-восточнее оз. Танганьика и юго-восточнее оз. Виктория.

Наиболее высокая гелиеисодержательность спонтанных газов (13—17%) обнаружена в источниках Маджи-Мото и Ньямаи (см. рис. 9).

В соответствии с описанием Джемса (1959) и Харриса [Harris, 1961] горячий источник Маджи-Мото расположен на южной стороне р. Мара, в 62 км к востоку от г. Мусома. Он вытекает из широкого заболоченного дна долины, заполненной аллювием, перекрывающим псевдопорфиры системы Ньянза (докембрий), около контакта с интрузивным гранитом. Аллювий контактирует с кислыми и основными вулканическими породами серии Мусома.

Из небольшого болотца, заросшего тростником, выходит несколько горячих источников, наибольший из которых образует небольшое озеро диаметром 4,6 м, с песчаного дна которого из вытянутой зоны поднимается непрерывный поток газовых пузырьков. Производительность источника около 6,8 м<sup>3</sup>/ч воды и 0,2 м<sup>3</sup>/ч газа, температура воды — 54° С, вода щелочная, с общей минерализацией около 6 г/л, главным образом за счет бикарбонатов и хлоридов натрия.

Анализ образцов газа, отобранных из центра источника, показал, что газ состоит главным образом из азота — 86,3% и гелия — 13,2% (табл. 49).

В результате выполненных в районе источника буровых работ было выяснено, что газ глубинного происхождения и что он поднимается на поверхность по разветвляющимся трещинам, связанным с поясами сдвигов. При опробовании интервала 39—130 м в одной из скважин был получен приток газированной соленой воды, составившей около 21 м<sup>3</sup>/ч. Содержание гелия в газе этой скважины было около 17,7%.

Название источника	Дата отбора проб	CH <sub>4</sub>	TU	N <sub>2</sub> +i	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	Ar	He+Ne
Танзания (Танганьика)											
Маджи Мото . . . . .	1957	—	—	86,3	0,1	—	0,4	—	—	—	13,2
Ньямози . . . . .	1957	0,5	—	84,2	0,2	—	0,2	—	—	—	17,9
Маньеги, ист. 2 . . . . .	1957	0,4	—	90,0	0,3	0,3	1,8	—	0,6	4,2	5,4
То же, ист. 5 . . . . .	1958	0,2	—	92,2	0	0,02	1,0	—	0	1,5	5,1
» , скв. GS <sub>10</sub> . . . . .	1958	—	—	89,3	0,01	0,7	1,4	—	0,4	1,6	6,7
Утебу . . . . .	—	1,6	—	94,6	0,4	—	4,2	0,1	0,4	1,02	0,74
Мпонда . . . . .	—	1,1	—	87,5	0,1	0,5	1,6	—	0,9	1,3	7,0
—	—	0,4	—	87,5	0,2	—	0,2	—	Следы	1,5	10,2
Южно-Африканская Республика											
Клиплан . . . . .	1959	86,5	—	10,4	—	—	0,02	—	—	0,5	2,6
Флорисбад . . . . .	1959	81,4	—	14,7	—	—	—	—	—	0,6	3,3
То же . . . . .	1961	82,5	—	13,8	—	—	0,02	—	—	0,7	3,0
Сев. Трансвааль											
Летаба . . . . .	1958	0,3	—	90,1	—	—	—	—	—	1,5	8,1
Алжир											
Хаммам Мелуан . . . . .	—	—	—	92,2	0,3	—	6,5	—	—	0,973	0,043

Горячий источник Ньямози расположен в нескольких милях от г. Тариме. Он находится на плоской возвышенности, сложенной микроамфиболитами с хорошо выраженными трещинами отдельности. Окружающие районы сложены мигматитовыми гнейсами и гранитами. Источник Ньямози расположен приблизительно на границе основных вулканических пород серии Мусома (pSm) и гранитов. На площади около 27 × 30 м по трещинам отдельностей в амфиболитах поднимается от 30 до 50 небольших источников горячих вод с температурой до 38—40° С, образующих мелкие воронки диаметром около 30 см и глубиной 8 см.

Всего из источника вытекает около 0,38 м<sup>3</sup> воды и 0,05 м<sup>3</sup> газа в час. Газ — азотного состава, содержит 17,9% гелия, вода щелочная, почти того же состава, что и в источнике Маджи Мото.

Большая группа теплых соленых источников встречается в Центральной Рифтовой долине, южнее источников Маджи Мото и Ньямози, между городами Додома и Сингида (см. рис. 9). Среди них крупнейшей является группа источников Маньеги. По данным Харриса [Harris, 1958], район выхода источников Маньеги сложен породами докембрийского мигматитового комплекса, в котором преобладают граниты. Источники протягиваются на расстоянии около 2,5 км вдоль зоны сброса. Характерно наличие системы сбросов юго-юго-восточного простирания с падением на восток, которая проходит примерно параллельно Центральному рифтовому уступу, приблизительно в 3 км к востоку от него.

Общий приток воды из этой системы источников около 19,0 м<sup>3</sup>/ч, газа — 3,7 м<sup>3</sup>. Воды несколько меньшей минерализации, чем воды источников Маджи Мото и Ньямози, примерно 3 г/л, меньше температура вод — 25—38° С, меньше и содержание гелия в газах — 4,4—6,7% (см. табл. 57).

Пробуренные сквозь сильно трещиноватые мигматиты скважины позволили выяснить, что теплые воды поднимаются вверх по сложной системе каналов, пересекающихся трещинами. В той же области Центральной Рифтовой долины имеется и еще целый ряд горячих источников гелиеносных газов, среди них Мпонде (He ≈ 10%), Тарква (He ≈ 7%), Гонга (He ≈ 9%) и др. Все они дают небольшое количество азотного газа с содержанием гелия свыше 2,5%. Джемс [James, 1959] и другие исследователи полагают, что все эти высокогелиеносные источники имеют вулканическое происхождение и что они, возможно, фумарольны по природе.

Харрис [Harris, 1958] придерживается несколько иного мнения о происхождении высокогелиеносных источников Танзании. Воды источников, по Харрису, смешанного происхождения — главным образом это инфильтрационные воды с газовой составляющей поверхностных вод, т. е. преимущественно с азотом, но, циркулируя на глубине, они смешиваются с поступающими с глубин магматическими эманациями, в том числе и с гелием и аргоном, нагреваются, обогащаются растворенными солями и, поднимаясь к поверхности, выделяют при атмосферном давлении растворенные в них газы.

Тот факт, что вулканическим эманациям не свойствен обычно гелий; тогда как в спонтанных газах Танзании он необычно высок по своему содержанию, Харрис объясняет природой магмы, богатой радиоактивными элементами, что подтверждается аномальной радиоактивностью вулканических пород Центральной Рифтовой долины. Азот в составе газов источников имеет, по мнению Харриса, атмосферное происхождение.

Таким образом, оба исследователя источников Танзании как Джемс, так и Харрис полагают, что высокая гелиеизация газов, растворенных в водах, связана с вулканической деятельностью, и лишь происхождение самих вод трактуется ими несколько по-разному. По Харрису, это смешанные воды, главным образом инфльтрационного и в меньшей мере ювенильного происхождения, по Джемсу — воды вместе с насыщающими их газами ювенильны.

В Западной Европе наиболее тщательное изучение состава газов минеральных источников было выполнено во Франции еще в 1911 г. Муре и Лепаном [Лукашук, 1933] с целью решения вопроса о промышленной добыче гелия из них. Всего ими было опробовано 108 источников, расположенных преимущественно в районе Центрального массива и по склонам Пиренеев. По составу обследованные газы подразделились на две группы — азотные и углекислые. Наиболее высокие концентрации гелия отмечены в азотных газах — от долей до нескольких процентов, в углекислых газах его значительно меньше. Самое высокое содержание гелия — 10,31% было найдено в азотном газе источника Сантены. Больше 1% гелия обнаружили и в ряде других источников азотных газов — Бурбон Ланси (2,09%), Десиз (1,15%), Эво (1,78%), Мезьер (8,61%), Пуилленей (7,70%) и др. Газовый дебит этих источников, как правило, очень низок, что исключило возможность их использования для промышленной добычи гелия. Из исследованных Муре источников только 7 имели дебит гелия лишь несколько больше  $1 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Особенно повышенная концентрация гелия в составе спонтанных газов, отмеченная в источниках, группирующихся по линии городов Мулен — Дижон, объясняется повышенной радиоактивностью пород Центрального массива, где находятся такие урановые месторождения, как Грюри, Люви, Отен и Утелуп.

На территории ФРГ также встречено высокое содержание гелия в спонтанных азотных газах минеральных источников, особенно выделяются источники Висбаден — 4,9, Бад-Дюркгейм — 1,8, Баден — 0,85 и Вильбад — 0,71%.

Относительно высокая гелиеизация газов, растворенных в воде (1,53%), отмечена в одной из скважин Секешфехервар, расположенной в районе Паннонского бассейна на территории Венгрии, юго-западнее Будапешта. Газ поступал из отложений карбона с глубины 820,5 м. Поскольку соседние скважины дали содержание гелия не выше 0,01—0,027%, Зелений [Szelenyi, 1941] высказал предположение, что газ поступает из гранитной интрузии карбонового возраста.

Содержание гелия в газах, спонтанно выделяющихся из источников, в Венгрии не превышает сотых долей процента. В спонтанном газе источника Соко-Баня в Югославии концентрация гелия составляет 0,15% [Szelenyi, 1941; Манцев, 1965].

Относительно хорошо изучен состав спонтанных и растворенных газов термальных и минеральных источников Болгарии. В ряде термальных источников, вытекающих из гранитов, спонтанно выделяющиеся азотные газы содержат, по данным Н. П. Пенчева [1961], повышенные концентрации гелия, достигающие 0,25%.

В Италии при общей низкой и пониженной гелиеизации газов, газ, выделившийся из соленой воды в скв. Абано (Падуа), состоял из 82,7% азота и 0,120% гелия.

Следует отметить, что приведенные нами данные о повышенных и высоких концентрациях гелия в спонтанных газах различных термальных и минеральных источников мира еще вовсе не свидетельствуют о высоких упругостях гелия в содержащих их водах, напротив, характеризуются обычно низкими газовыми факторами, они, по-видимому, имеют невысокую упругость гелия. В частности, это может быть отнесено в значительной мере к спонтанным гелиевым газопроявлениям Западной Европы. Многочисленные спонтанные высокогелиеизационные газопроявления обнаружены во многих районах территории СССР.

#### § 4. ГЕЛИЕИЗАЦИЯ ГАЗОВ, ВЫДЕЛЯЕМЫХ ВУЛКАНАМИ, ФУМАРОЛАМИ И Т. П.

Имеются совершенно различные по своему происхождению и формам проявления на поверхности глубинные газы, изучение которых представляет значительный научный интерес. Среди них особое место занимают вулканические газы магматического происхождения вместе со спонтанно выделяющимися газами различных горячих источников, которыми изобилуют вулканические районы, — фумарол, гейзеров и т. п., а также газы грязевых вулканов.

Исследование их газоносности сопряжено со значительными трудностями, поэтому данные о гелиеизации природных газов этого типа ограничены и относятся главным образом к фумарольным газам и грязевым вулканам. Промышленного значения с точки зрения добычи гелия они обычно не имеют.

#### Вулканические газы магматического происхождения

Среди вулканических газов выделяют эруптивные газы, выбираемые в огромных количествах во время извержения вулкана, и фумарольные, выделяемые в период его спокойной деятельности. Состав эруптивных газов, в том числе и их гелиеизация практически не изучены в связи с недоступностью вулкана во время его извержения.



Таблица 50

## Химический состав газов (об. %) вулканического происхождения

Страна	Местоположение	Характер газопроизведения	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> +1	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	Ar	He+Ne	Источник сведений																																																							
Италия	Лардерелло, Поссера-Феро,	—	6,5	0,8	—	1,5	93,1	—	2,5	—	0,0022	Szelenyi [1941]																																																							
	Кастельновини	—	5,0	—	—	—	92,8	—	2,2	—	0,0025	То же																																																							
	Лардерелло, соффион, № 1	—	5,9	1,0	—	1,6	93,4	—	2,4	—	0,0025	»																																																							
	То же, № 2	—	6,3	1,0	—	1,7	93,1	—	2,4	—	0,023	»																																																							
	Тоскана	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,26	В. В. Белоусов [1934]																																																							
	Травале, Феро-Пьетри	—	7,6	2,5	—	0,3	94,2	—	0,6	—	0,021	Szelenyi [1941]																																																							
	Лаго Пескайя	—	11,3	0,5	—	6,8	87,4	—	3,3	—	0,0029	То же																																																							
	Лагои Росси	—	9,9	0,9	—	5,6	88,8	—	2,9	—	0,0028	»																																																							
	Серразано, Феро Сьяно	—	6,5	0,6	—	2,5	92,7	—	2,5	—	0,0019	»																																																							
	Кастельнуово, Фаркононале	—	6,2	0,9	—	2,9	92,0	—	3,0	—	0,021	»																																																							
	Кастельнуово, Мадонна	—	5,6	0,9	—	1,3	94,3	—	1,8	—	0,0021	»																																																							
	Кратер Агнано	—	—	99,00	Следы	—	—	—	—	0,904	0,052	В. П. Савченко [1935]																																																							
	Исландия	Горячие источники	Спонтанный	—	98,34	—	—	—	—	—	1,61	0,0146	А. И. Лукашук [1933]																																																						
Рейкир, № 5		»												0,9	16,5	—	—	2,8	0,294	0,0050	То же																																														
Хверавеллир, № 2																						»	1,0	20,6	0,2	—	—	0,414	0,0063	»																																					
То же, № 25																															»	0,8	90,0	1,1	—	—	1,68	0,0104	»																												
Граффарбанки, № 1																																								»	0,7	97,4	—	—	—	1,93	0,0104	»																			
Лаугарас, № 1																																																	»	0,2	67,9	—	—	—	1,36	0,0103	»										
Рейкьяфосс, № 1																																																										»	0,3	1,8	—	—	—	0,011	0,0006	»	
Хенджилл, № 1																																																																			»
То же, № 3	»		—	—	—	—	—	—	—	0,00145	Szelenyi [1941]																																																								
Индонезия		Остров Ява										—	—	—	—	—	—	—	—	—	—																																														
Япония		Фумаролы										Свободный	2,2	3,2	—	—	—	—	—	—	0,003	То же																																													
																							Сольфатары	»	5,9	15,3	—	—	—	—	—	—	0,001	»																																	
Болгария		Потухший вулкан Кожух										Мелкие газовые струи	13,0	—	0,80	—	—	—	—	0,14	0,0030	Пенчев [1961]																																													
																							То же	Водно-газовый фонтан	1,49	8,67	1,45	—	—	—	—	—	0,0038	То же																																	

Отбираемый в крайне опасных условиях газ в краевых зонах извергающегося вулкана, а также из расплавленных лав, как правило, смешан с воздухом. Значительно более доступны аналитическому исследованию фумарольные газы, но их ценность с точки зрения характеристики гелиеносности глубинных газов значительно ниже, так как они тоже смешаны с воздухом и, кроме того, в значительной мере изменены различными вторичными реакциями.

Сведения о составе газов вулканических эманаций приводятся во многих работах, в частности, хорошая их сводка дана в статье Д. Е. Уайта и Г. А. Уоринга [1965], но данные о содержании гелия в них отсутствуют. Некоторые сведения о содержании гелия в газах естественных газопроявлений, обнаруженных в районах современной вулканической деятельности, приведены в табл. 50. Газам вулканических эманаций свойственна обычно невысокая гелиеносность, реже — повышенная. Не исключено, что их низкая гелиеносность обусловлена в ряде случаев погрешностями метода отбора проб, а не действительным их составом.

Сравнительно низкое содержание гелия (0,003—0,004%) обнаружено в газе, состоящем в основном из  $\text{CO}_2$ , который выходит в районе потухшего вулкана Кожух (Болгария), причем за сутки здесь выделяется до 1 т углекислоты [Петров и др., 1963].

Особое место среди естественных глубинных газопроявлений занимают грязевые вулканы. Некоторые из них связаны с сольфатарной деятельностью магматических вулканов. Но имеется целая группа грязевых вулканов, связанных в своей географической приуроченности не с магматическими вулканическими районами, а с осадочными отложениями нефтегазовосных районов. Многие из них находятся на территории СССР — в Крыму, на Кавказе, в Туркмении и на Сахалине, имеются они также и за рубежом — в Румынии, Индии, на некоторых островах Малайского архипелага и на острове Тринидад. Происхождение грязевых вулканов — предмет острой и долготейшей дискуссии. Абих связывает их с магматической деятельностью Земли, к этому же мнению присоединяется и Н. А. Кудрявцев [1965].

В. А. Соколов вместе со многими другими исследователями полагает, что грязевые вулканы имеют осадочное происхождение и непосредственно с магмой не связаны. Состав газов, выделяемых грязевыми вулканами, преимущественно метановый с незначительными примесями углекислоты и азота. Тяжелые углеводороды, если и обнаруживаются, то в небольших количествах. Гелий в них присутствует всегда, но общее его содержание обычно не превышает тысячных долей процента, реже сотых. По общему химическому составу и гелиеносности газы грязевых вулканов сходны с газовыми месторождениями третичного и в меньшей мере мезозойского возраста. Особенно это сходство подчеркивается общей для них гелиеносностью. Как правило, гелиеносность газов, выделяемых грязевыми вулканами, соответствует гелиеносности газов отложений, к которым, судя по данным палеонтологического и петрографического

изучения твердых продуктов извержения, приурочены «корни» грязевых вулканов. Для третичных отложений — тысячные доли процента, для мезозойских — несколько больше, до 0,030%.

## § 5. ГЕЛИЕНОСНОСТЬ ГАЗОВ, СВОБОДНО ВЫДЕЛЯЮЩИХСЯ ИЗ ШАХТ, РУДНИКОВ И СОЛЯНЫХ КОПЕЙ

Обширный материал о содержании гелия имеется по угольным газам, выделяющимся из различных шахтных выработок, значительно меньше его — по металлическим рудникам, и лишь единичные данные о гелиенасыщенности имеются по газам соляных копей.

Максимальная гелиенасыщенность газов отмечается в урановых рудниках, несколько меньшая — в полиметаллических. Угольным газам свойственна обычно фоновая гелиенасыщенность, характерная для свободных газов продуктивных отложений того же возраста, а соляным — несколько, а иногда и значительно меньше фоновой. Промышленного значения все эти газы с точки зрения добычи гелия обычно не имеют в связи с недостаточными притоками газа, хотя в ряде случаев могут быть и исключения.

Так, например, исследования свободно выделяющихся газов, поступающих из поверхностных скважин и вентиляционной системы на золото-урановом месторождении Витватерсранд, выполненные Геологической службой Великобритании и Южной Африки [Bowie, 1958; Hugo, 1963; Haggis, 1961] показали, что запасы газов, выделяющихся из вентиляционной системы рудников с общим дебитом около 27 млн. м<sup>3</sup> в год при средней гелиеносности газов, равной примерно 5%, вполне достаточны для промышленного извлечения гелия.

Однако необходимо отметить, что для месторождения Витватерсранд характерна не только уникальная гелиеносность природных газов — 13,3% (рудник Заапласо), но также и значительная общая газоносность продуктивной части разреза, обеспечивающая достаточно высокие дебиты газа.

Золото-урановое месторождение Витватерсранд находится на территории Южно-Африканской Республики. Впервые на высокую гелиеносность метановых газов этого месторождения обратил внимание английский исследователь Боуи [Bowie, 1958], обнаруживший при масс-спектральном исследовании газа из скважины рудника Вирджиния 8,3% гелия. Сделанное открытие вызвало со стороны Великобритании значительный интерес к рудничным газам этого месторождения, как к возможному источнику гелия, в котором нуждалась страна для атомных реакторов с гелиевым газом-охладителем. Выполненные Геологической службой Великобритании масс-спектральные исследования рудничных газов показали, что их гелиеносность меняется от 2 до 13%. Несколько позже, уже в 1962 г., более широкие исследования гелиеносности природных газов Витватерсранда были выполнены Хьюго [Hugo, 1963].

Местоположение	Дата спробования	СН <sub>4</sub>	ТУ	N <sub>2</sub> +I	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	Ag	He + Ne
Рудник Вирджиния											
Скв. 1 . . . . .	III. 1958	76,6	—	13,9	—	—	0,4	—	—	0,5	8,3
Подземные выработки . . . . .	XI. 1958	72,88	—	13,48	—	—	0,03	—	—	0,92	12,7
То же . . . . .	I. 1959	72,22	—	13,79	—	—	0,16	—	—	0,90	12,93
» . . . . .	I. 1959	73,2	—	13,8	—	—	0,06	—	—	0,97	11,9
Рудник Заайплас											
Скв. 4 . . . . .	III. 1962	73,3	—	14,8	—	—	0,05	0,1	—	0,6	11,1
Шахта 5 . . . . .	III. 1962	74,2	—	13,1	—	—	0,5	0,1	—	0,9	11,7
Рудник Сент-Хелина											
Скв. 10 . . . . .	IV. 1962	83,1	—	10,0	—	—	0,1	—	—	0,4	6,4
Рудник Президент											
Шахта 6 . . . . .	XI. 1959	75,42	—	12,96	—	0,03	0,10	—	—	0,86	11,63
Скв. 8 . . . . .	III. 1962	78,7	—	13,6	—	—	0,1	0,2	0,5	0,5	6,9
Рудник Уэстерн Холдингс											
Скв. 13 . . . . .	III. 1962	88,7	—	7,7	—	—	0,1	0,1	—	0,3	3,1
Скв. 14 . . . . .	III. 1962	88,1	—	7,8	—	—	0,1	—	—	0,4	3,6
Скв. 15 . . . . .	X. 1961	88,03	—	7,56	—	—	0,09	—	—	0,36	3,68
Рудник Уэлком											
Шахта 22 . . . . .	III. 1959	77,03	—	14,8	—	—	0,06	—	—	0,62	7,48
Шахта 23 . . . . .	II. 1959	79,84	—	13,31	—	0,05	0,07	—	—	0,56	6,17

Конгломератные рифы золотоносной зоны месторождения приурочены к протерозойским породам системы Витватерсранд, состоящим из чередования пачек кварцитов и сланцев, общей мощностью до 7,5 тыс. м, лежащих несогласно на архейских породах.

Рудное поле охватывает грабен верхневитватерсрандских слоев, опущенный между большими глыбами нижневитватерсрандских отложений. На востоке грабен ограничен крупным сбросом, на западе — перегибом, осложненным сбросами.

Глубина залегаания продуктивного горизонта на большей части рудного поля 1300—1500 м. На месторождении добывается золото, но уран является более распространенным в этих породах, чем золото. Среднее содержание U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> на 1 т рифов — 0,19 кг. Гелиеносный газ, состоящий главным образом из метана, выделяется из конгломератных рифов Элсбург системы Витватерсранд. Расчеты, выполненные Хьюго, показали, что общее количество гелия, который должен был бы выделиться из продуктивных золотоносных отложений, составляет около 1,39 млн. м<sup>3</sup> в год, тогда как ежегодно только через вентиляционную систему месторождения выделяется более 27 млн. м<sup>3</sup>, т. е. значительно больше. По мнению Хьюго, гелий, поступающий в выработки, мигрирует к ним со значительной площади. Образующими гелий являются как породы Витватерсранда, так и перекрывающие их отложения Вентерсдорп с общей высокой урановой минерализацией.

Сведения о составе газов, выделяемых различными поверхностными скважинами и вентиляционной системой рудников Витватерсранда, приведены в табл. 51. На руднике Заайплас обнаружен газ с предельной, по известным данным, гелиеносностью рудничных газов — 13,3%, в газе примерно столько же азота, остальное — метан.

Не столь высокое, но повышенное содержание гелия (0,37%) обнаружено также и в газах, выделяющихся на медных рудниках мульд Зенгерхаус и Мансфельд, к северу от Тюрингского бассейна. По данным Курца [1963], на 1 т добытой породы медистых сланцев цехштейна приходится 4,83 м<sup>3</sup> газа, состоящего из азота. В составе газа имеется также до 0,8% углекислого газа и 1,6% водорода. В одной из проб было обнаружено 0,37% гелия и 0,58% аргона.

Таблица 52

Химический состав (об. %) рудничных газов Швеции [Осянов, Яницкий, 1966]

Газы	Рудники		Газы	Рудники	
	Болиден	Даннемор		Болиден	Даннемор
CH <sub>4</sub>	68,71	70,0	CO <sub>2</sub>	0,1	0,1
N <sub>2</sub>	24,3	19,7	CO	0,1	0,8
O <sub>2</sub>	1,1	1,8	He + Ne	4,3	6,0
H <sub>2</sub>	1,0	0,4			

Таблица 53

Химический состав природных газов (об. %) угольных месторожде

Страна	Месторождение	Глубина, м	Химический состав			Газовый состав					Источник сведений	
			CH <sub>4</sub>	TV	N <sub>2</sub> +1	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ar	He+Ne		
Франция	Анзен	—	97,92	—	1,85	—	—	0,16	0,021	0,044	Szelenyi [1941]	
	Ланс	—	98,15	—	1,81	—	—	—	0,037	0,0003	То же	
	Льевен	—	97,03	—	2,41	—	—	0,5	0,04	0,013	»	
	Креспен	—	—	—	0,3	—	—	—	—	0,055	»	
	Трели	—	—	—	—	—	—	—	—	0,086	»	
	Спиттель	—	98,26	—	1,05	—	—	0,67	0,016	0,0023	В. В. Белоусов [1934]	
Бельгия	Шарлеруа	—	—	—	1,81	—	—	—	—	0,330	Szelenyi [1941]	
	Льеж	—	—	—	0,26	—	—	—	—	0,057	То же	
	Монс	—	99,60	—	0,32	—	—	Следы	0,003	0,050	А. И. Лукашук [1933]	
ФРГ	Ашеберг	920	94,1	—	1,5	—	—	—	0,014	0,076	Kauter [1962]	
	Ален	—	92,20	—	6,70	—	—	0,40	0,08	0,19	То же	
	Цехе	1000	—	—	—	—	—	—	—	0,09—0,13	Szelenyi [1941]	
	Эвальд	—	74,4	—	—	—	—	—	—	0,22	То же	
	Обернкирхен	—	60,5	37,6	—	—	—	2,5	—	0,049	»	
	Франкенхольд — Палатинат	—	—	95,1	—	2,06	—	—	2,80	0,021	0,027	Kauter [1962]
	Угольные шахты Нижнего Рейна, скв. 1	550	85,6	—	—	—	0,4	0,6	—	0,15	Hedemann [1963]	
	То же	550	84,4	—	—	13,3	—	—	—	—	0,13	То же
	»	550	83,4	—	0,01	14,4	—	—	—	—	0,7	»
	То же, скв. 2	650	84,2	—	0,02	15,6	0,1	3,5	1,9	—	0,1	»
	Угольные шахты Нижнего Рейна, скв. 3	650	76,4	—	—	23,0	0,1	0,2	0,2	—	0,1	»
	То же	650	76,0	—	—	33,0	—	0,6	—	—	0,1	»
	»	650	78,4	—	0,01	20,9	—	—	0,2	—	0,5	»
	» , скв. 4	450	80,0	—	—	19,6	—	0,4	—	—	0,03	»
	» , скв. 5	650	87,3	—	—	12,5	0,07	0,2	0,2	—	0,007	»
	То же	650	85,8	—	—	13,7	0,4	0,2	0,2	—	0,006	»
	» , скв. 6	650	86,0	—	Следы	12,5	—	0,4	1,1	—	Следы	»
	»	650	89,4	—	0,02	9,2	—	0,5	0,9	—	<0,01	»
	» , скв. 7	500	91,0	—	—	7,8	—	0,5	0,7	—	0,007	»
	» , скв. 8	650	95,7	—	<0,2	3,2	—	—	1,1	—	<0,001	»
	То же	650	92,0	—	0,84	7,2	—	—	—	—	0,09	»
	»	650	83,51	—	3,21	11,47	—	—	1,8	—	0,01	»
	»	650	96,21	—	0,08	3,66	—	0,012	—	—	0,038	»
» , скв. 9	650	88,7	—	1,0	8,8	—	—	0,3	—	0,02	»	
»	650	97,6	—	0,06	1,9	—	—	0,5	—	—	»	
»	650	91,6	—	0,2	7,5	—	—	0,9	—	0,001	»	
»	650	90,5	—	0,106	9,4	—	—	—	—	0,002	»	
» , скв. 10	550	84,2	—	<0,1	14,7	—	0,5	0,6	—	0,02	»	
»	550	85,2	—	<0,1	12,8	—	0,7	0,3	—	0,01	»	
» , скв. 11	550	89,9	—	1,1	6,9	—	0,4	1,7	—	Следы	»	
»	550	89,0	—	0,06	11,0	—	—	—	—	0,08	»	
Япония	Остров Хоккайдо, Юбари	268	96,10	—	3,42	—	—	0,27	—	0,007	Hedemann [1963]	
	То же	157	94,92	—	6,58	—	—	0,12	—	0,004	То же	

Примечание. Характер газопроявления — свободное выделение газа. Восточный мел, угольных шахт Нижнего Рейна — C<sub>3</sub>.

ний

раст горизонта месторождения Ашеберг — меловой, месторождения Обернкирхен —

В составе углеводородных газов, выделяющихся из подземных скважин на полиметаллических рудниках Швеции (Болиден, Даннемор), по данным двух анализов содержится до 6% гелия (табл. 52).

Гелиеносность горючих газов, связанных с угольными месторождениями, лучше всего изучена на территории Западной Европы.

В ФРГ при бурении на уголь в Вестфалии в верхнемеловых отложениях, перекрывающих угленосные пласты карбона, отмечается высокая газонасыщенность отложений. Нередко она обнаруживается и в самих каменноугольных пластах. В Ашеберге (ФРГ) газоносные горизонты, вскрытые на глубине 920 м в отложениях турона (верхний мел), на глубине 1049 м в отложениях сеномана и на глубине 1140 м в каменноугольных отложениях, содержали около 0,08% гелия [Kauter, 1962].

Газ в Эвальде (Вестфалия) содержал 0,22% гелия, а газ, выходящий с глубины 1000 м из угольных копей Цехе, содержал 0,09—0,13% гелия. Концентрация гелия в верхнекаменноугольных газах западного берега Нижнего Рейна достигала по некоторым шахтам 0,1—0,7% [Hedemann, 1963].

В угольных рудниках Оберкирхена, близ Бюкебурга (ФРГ), содержание гелия в составе газов, выделяющихся из вельдской угленосной формации (нижний мел), составляет 0,049%, несколько меньше гелия (0,027%) в каменноугольном газе Франкенхольца в Саарском угольном бассейне [Szeleuyi, 1941]. Содержание гелия в угольных копях Франции и Бельгии не превышает, по данным исследований, выполненных Муре и Лепаном, нескольких сотых долей процента (табл. 53).

Содержание гелия в природных газах соляных копей обычно значительно ниже фоновой гелиенасыщенности газов того же возраста, хотя и далеко не всегда. Это обусловлено высокой миграционной способностью как газа в целом, так и гелия в частности. Гелиеносность газов нефтегазонасыщенных горизонтов, подстилающих соляную свиту верхнего цехштейна на калийной шахте Фолькенрода (ГДР), составила 0,088%; примерно такая же гелиеносность свойственна и газам, поступающим из соляных выработок.

Повышенное содержание гелия (0,17%) выявлено в газе соляной копи Леопольдсхолла, близ Стассфурта (ГДР). Характерен состав этого газа: 83,6% водорода и 11,8% азота, дебит крайне незначителен. Повышенное содержание гелия отмечается также и в калиевых минералах Стассфуртского месторождения [Лукашук, 1933].

В газах соляных отложений района Кияву (Польша), в соляных копях Иноврацлавы и Клодавы содержится 0,01—0,10% гелия.

Низкое содержание гелия (0,003—0,007%) характерно для азотноуглеводородных газов соляных копей Березняковского и Соликамского рудников [Несмелова, 1959].

## Глава VI

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ КОРЫ ЗЕМЛИ

Гелий является повсеместно распространенным, но весьма рассеянным элементом в осадочной толще. Генезис и физико-химические свойства гелия обуславливают и его распределение в толще седиментационных отложений.

Полная химическая инертность в естественных условиях недр, низкая адсорбционная способность, высокая проницаемость и генетическая связь с радиоактивными элементами — вот те основные факторы, которые регулируют его распределение в недрах.

#### § 1. БАЛАНС ГЕЛИЯ В СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Гелий осадочной толщи земной коры имеет смешанное происхождение. Он может быть сингенетичным осадочной толще, образованным в результате распада радиоактивных элементов, присутствующих в ней, транзитным, мигрирующим из глубоких недр земли к ее поверхности, и седиментационным, прихваченным осадками из атмосферы при процессах осадконакопления.

Общее уравнение баланса гелия для осадочных отложений ( $He_{осад}$ ) в его генетической форме имеет следующее выражение:

$$He_{осад} = (He_{седим} + He_{глуб} + He_{свнг}) - He_1,$$

где  $He_{седим}$  — гелий седиментационный, погребенный вместе с газами, растворенными в водах, насыщающих отложения в процессе их седиментации. Общее количество гелия, захороненного вместе с поверхностной водой при осадкообразовании, составляет примерно  $0,4 \cdot 10^{-4}$  см<sup>3</sup> в 1 л воды (при условии постоянства состава атмосферного воздуха в различные эпохи времени);  $He_{глуб}$  — гелий глубинный, мигрирующий в осадочные отложения из пород фундамента;  $He_{свнг}$  — гелий, образующийся в толще осадочных пород в процессе  $\alpha$ -распада содержащихся в ней радиоактивных элементов;  $He_1$  — гелий, теряемый осадочными отложениями за счет его утечки в атмосферу.

Сравнительно легко может быть учтена доля воздушного гелия, погребенного при седиментации ( $He_{свдм}$ ), а также образовавшегося в породах при процессах  $\alpha$ -распада ( $He_{освнг}$ ), но значительно труднее учесть долю транзитного гелия, как поступающего из глубинных недр ( $He_{глуб}$ ), так и теряемого осадочной толщей в атмосферу ( $He_1$ ).

Относительное значение каждого из компонентов в общем гелиевом балансе широко изменяется в зависимости от геоструктурного

положения объекта исследования. Для мощной толщи кайнозоя, в районе глубокого современного прогибания, преобладающей является доля седиментационного гелия, тогда как для отложений нижнего палеозоя, залегающих непосредственно на докембрийском фундаменте, преобладающим элементом гелиевого баланса в условиях длительной гидрогеологической закрытости может оказаться глубинный гелий.

Для верхов палеозоя и нижнего мезозоя, достаточно удаленных как от фундамента, так и от поверхности, основная роль в гелиевом балансе будет принадлежать сингенетическому гелию, образовавшемуся в результате ядерных реакций внутри осадочной толщи.

Детальное разграничение сфер основного влияния каждого из элементов баланса внутри толщи осадочных отложений затруднительно как в связи с многообразием геологических и палеогидрогеологических условий их существования, так и в связи с неразработанностью вопросов газовой кинетики в недрах.

Основные затруднения вызывает решение вопроса о доли участия транзитного гелия, мигрирующего из коровых и подкоровых глубин, в гелиевом балансе осадочной толщи. Величина этого компонента баланса переменна по своей величине на различных участках осадочной толщи.

Интенсивность проникновения глубинного гелиевого потока в осадочную толщу находится в зависимости от следующих основных факторов: градиента концентраций, диффузионной проницаемости осадочной толщи, интенсивности вулканической деятельности, а также процессов конвекции флюидов в осадочной толще и, наконец, длительности процесса проникновения глубинного потока гелия в осадочную толщу, т. е. от возраста отложений. В свою очередь эти величины определяются многими другими факторами, в частности — удаленностью точки исследования от поверхности фундамента, общей мощностью осадочной толщи, перекрывающей породы фундамента, составом, состоянием, коллекторскими свойствами и возрастом осадочных пород, гидродинамическими условиями существования флюидов, насыщающих осадочную толщу, величиной гелиевого потенциала поверхности кристаллического фундамента и многими другими факторами, достоверный учет которых почти никогда не возможен.

В соответствии с существующими представлениями о современном распределении радиоактивных элементов по геосферам Земли их основная масса сосредоточена в земной коре; в пределах земной коры — в ее верхнем гранитном слое, а в пределах гранитного слоя — в самых внешних, наиболее поздних по стадии кристаллизации магмы, массивах пород. Гранитный слой коры не имеет повсеместного распространения, он развит преимущественно на континентах, в верхнем слое материковой коры.

Рис. 11 наглядно иллюстрирует характер распространения гранитов. Учитывая основную приуроченность к ним радиоактивных элементов, можно предположить, что возможности генерации гелия

земной корой в пространстве неодинаковы — они выше на континентах и ниже в океанических впадинах. Генерационный потенциал гелия, создаваемый столбом породы сечением  $1 \text{ км}^2$  на глубину 50 км, составляет в пределах океанической части коры  $0,9 \text{ м}^3/\text{год}$ , а в континентальной —  $4,5 \text{ м}^3/\text{год}$ . Параметры, принятые за основу при этом расчете, приведены в табл. 54 и на рис. 11. Если принять во внимание, что масштабы потери гелия отстают от масштабов его генерации, то можно сделать вывод, что каждый из континентов земли представляет собой крупную гелиевую аномалию с тем более высоким потенциалом, чем мощнее толща гранитов в ее коровой части и чем более высокая обогащенность гранитов радиоактивными элементами.

Используя данные, приведенные в табл. 54, можно ориентировочно рассчитать, что только за последний миллиард лет на каждом квадратном километре площади континента в верхнем 50-километровом слое пород образовалось  $4,5 \cdot 10^9 \text{ м}^3$  гелия, а в океанической части коры —  $0,9 \cdot 10^9 \text{ м}^3$  гелия.

Потери гелия за счет диффузии на различных участках коры неодинаковы, более высокие — в ее континентальной части, породы которой имеют крупнокристаллическую структуру, особенно в зоне распространения гранитов, и несколько меньшие — в океанической.

Различие в величинах гелиевых потенциалов в коре Земли проявляется не только в планетарном масштабе, на участках ее океанических и континентальных зон, но также и в более локальном масштабе, обусловленном местными геохимическими различиями

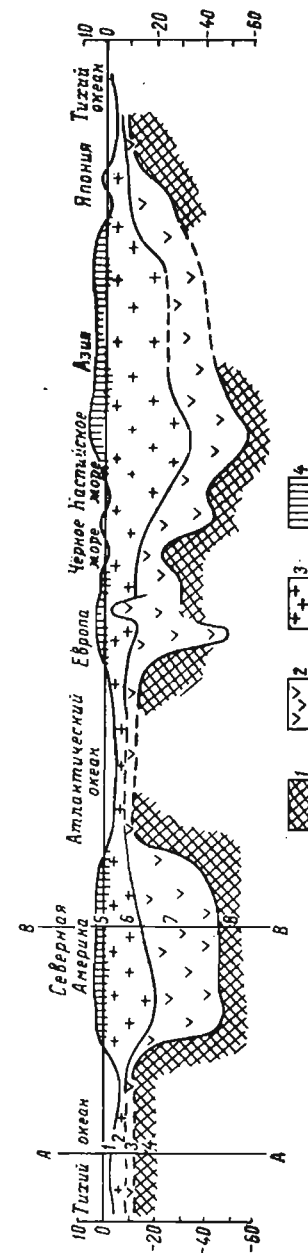


Рис. 11. Разрез земной коры на  $45^\circ$  с. ш. по сейсмическим данным, по Клоссу и Бенке [Ханн, 1964].

1 — перидотитовый слой; 2 — базальт; 3 — граниты; 4 — осадки (нанесены схематично). Номера слов (1—4) приведены в табл. 55.

Таблица 54

## Гелиегенерационный потенциал океанической и континентальной част

Местонахождение	Номер слоя рис. 11	Состав слоя	Мощность слоя, м	Объемн. вес, т/м <sup>3</sup>	Общий вес слоя, т
Тихоокеанская впадина	1	Вода	3 000	1,0	3 000
	2	Граниты	4 000	2,7	10 800
	3	Базальты	5 000	3,0	15 000
	4	Перидотиты	38 000	3,5	133 000
Северо-Американский континент (платформа)	5	Осадки	4 000	2,0	8 000
	6	Граниты	16 000	2,7	43 200
	7	Базальты	26 000	3,0	78 000
	8	Перидотиты	4 000	3,5	15 750

в составе магмы, из которой сформировалась кора. Так, в районах урановых геохимических провинций величина гелиевого потенциала значительно выше, чем на участках с кларковыми содержаниями радиоактивных элементов.

Таким образом, величина гелиевого потенциала поверхности фундамента Земли постоянно изменяется в пространстве в зависимости от геотектонических и геохимических особенностей строения коры Земли.

Мигрируя к земной поверхности из глубин, свободный гелий входит вначале в метаморфическую, а затем в осадочную толщу пород и, растворяясь во флюидах, ее насыщающих, продолжает свой дальнейший путь как путем диффузии, так и фильтрации к поверхности, в атмосферу. Примерно так же мигрирует и гелий, подходящий с глубин ко дну океанических впадин. Вступая в воды океана, он растворяется в них, тогда как океан обеспечивает постоянное подвижное равновесие растворенных в его водах газов, в том числе и гелия, с атмосферой.

Интересное обсуждение проблемы скорости и интенсивности движения глубинного гелиевого потока в глубь осадочной толщи проведено Ньютоном и Роундом [1961]. В основе выполненного ими математического анализа процесса миграции гелия через осадочные породы положены следующие предпосылки.

Источником гелия являются породы фундамента. В породах основания содержится примерно 0,005 молей гелия на литр порового

ей земной коры (для 50-километрового столба пород сечением 1 м<sup>2</sup>)

Кларковые концентрации радиоактивных элементов, г/г [по Виноградову, 1962; Косца, 1964]		Количество радиоактивных элементов, т		Количество генерируемого гелия, см <sup>3</sup> /год		
U	Th	U	Th	U	Th	U + Th
$3,0 \cdot 10^{-9}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-8}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$	$0,16 \cdot 10^{-8}$	$1,08 \cdot 10^{-6}$
$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	2,7	14,0	0,32	0,38	0,70
$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,75	4,5	0,09	0,12	0,21
$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$3,99 \cdot 10^{-2}$	$6,65 \cdot 10^{-2}$	$0,48 \cdot 10^{-2}$	$0,18 \cdot 10^{-2}$	$0,66 \cdot 10^{-2}$
Итого . . . . .		3,45	18,6	0,41	0,50	0,91
$3,2 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,56	8,8	0,31	0,24	0,55
$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	10,8	56,2	1,30	1,52	2,82
$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	3,9	23,4	0,47	0,63	1,10
$3,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$0,56 \cdot 10^{-3}$	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$0,77 \cdot 10^{-3}$
Итого . . . . .		17,26	88,40	2,08	2,39	4,47

пространства. За породы основания приняты гнейсы возрастом  $4 \cdot 10^9$  лет с пористостью 3% и удельным весом  $3 \text{ г/см}^3$ . Палеозойские осадки, появившиеся впервые около 500 млн. лет назад, могли накопить не более 0,1 количества гелия в породах фундамента. К тому же это количество распределилось по значительно большему объему пор. Поэтому объемом гелия, образующимся в осадочных породах, пренебрегают. Между фундаментом и атмосферой имеется значительный градиент концентраций, обуславливающий молекулярную диффузию гелия сквозь породы осадочной толщи. Благодаря различию в скорости диффузии гелия в твердом веществе  $\approx 10^{-10} \text{ см}^2/\text{сек}$  и в жидкости  $\approx 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$  основной поток гелия будет двигаться главным образом сквозь поры пород.

Иные способы миграции гелия (в пузырьках газа или в растворенном виде с движущимися флюидами) по мнению Ньютона и Роунда, несопоставимо малы по своим масштабам сравнительно с миграцией за счет диффузии, поэтому они не учитываются. Основным механизмом миграции гелия является, по мнению этих исследователей, однонаправленная диффузия гелия от пород фундамента, как источника, сквозь вышележащие слои осадочных пород, представляющих собой пористую стратиграфическую колонку с коэффициентом диффузии  $10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$ .

Процесс диффузии начинается с момента осадкообразования.

Выполненный Ньютоном и Роундом математический анализ при сделанных допущениях привел их к выводу, что скорость

накопления осадков выше скорости диффузии гелия. На рис. 12 приведены численные примеры решения Ньютоном и Роундом отдельных математических моделей, иллюстрирующих экспоненциальное убывание потока гелия и его концентраций (б). Кривые концентрации — расстояние даны ими для трех периодов —  $10^7$ ,  $10^8$  и  $10^9$  лет после начала осадкообразования. Сравнение этих кривых показывает,

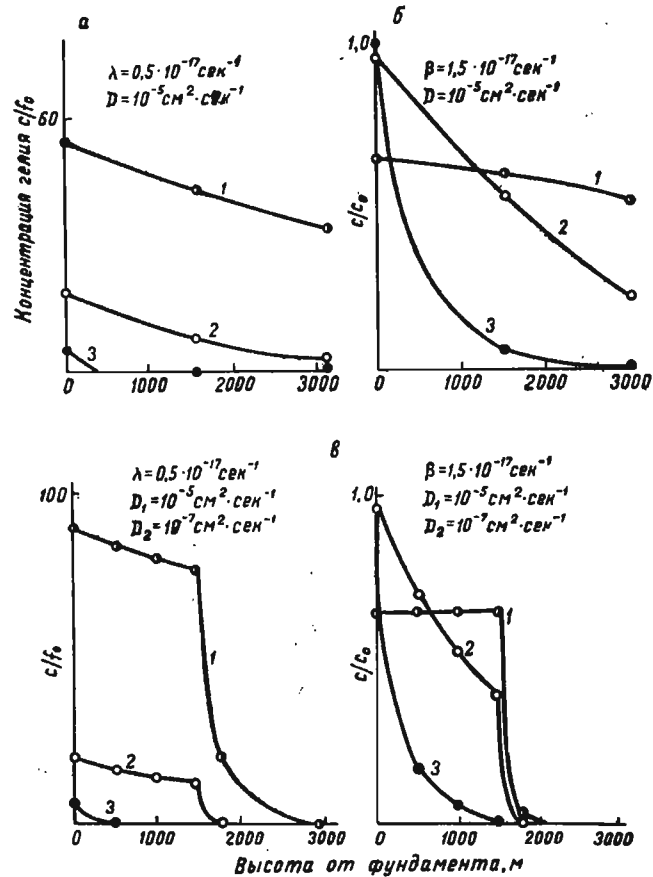


Рис. 12. Модели, иллюстрирующие разницу между нижними граничными условиями экспоненциального убывания потока (а) и концентрации (б) гелия, а также влияние верхней среды на коэффициент диффузии (в), по Ньютону и Роунду [1961].

Возраст пород: 1 —  $10^8$  лет; 2 —  $10^9$  лет; 3 —  $10^7$  лет.

что при принятых авторами наиболее оптимальных условиях лишь небольшие количества гелия достигают заданного уровня — 3,3 км от основания, а если однородный слой пород с  $D = 10^{-5} \text{см}^2/\text{сек}$  перекрыт сверху слоем с меньшей диффузионной проницаемостью —  $D = 10^{-7} \text{см}^2/\text{сек}$ , то за время  $10^8$  лет гелиевый поток успеет лишь войти в этот верхний слой, полностью погасившись в самом нижнем его участке (см. рис. 12, б).

Полагая, что принятые при числовых расчетах наиболее оптимальные условия диффузии гелия являются предельными для пористой среды осадочной толщи, Ньютон и Роунд заключают, что прак-

тически заданного уровня 3,3 км достигают значительно меньшие количества гелия и что скорость накопления осадков выше скорости диффузии гелия. Иными словами, роль глубинного гелия в общем гелиевом балансе осадочной толщи весьма ограничена для верхней части толщи осадочных отложений (выше 3 км), хотя может оказаться и весьма существенной для ее нижней, древней по возрасту, части.

Выполненные Ньютоном и Роундом расчеты представляют безусловный интерес как попытка решения проблемы с помощью физико-математического моделирования, но полученные результаты следует рассматривать как дискуссионные.

Трудно, например, согласиться с авторами, что в основе переноса гелия из глубоких недр лежит только процесс диффузии. По-видимому, перенос гелия вместе с вертикально мигрирующими флюидами играет достаточно существенную роль в общем явлении его массового переноса и пренебрегать им нет оснований. Явления вертикальной миграции флюидов подтверждаются многочисленными данными гидрогеологических исследований.

Совершенно иные результаты оценки интенсивности диффузии гелия приводят В. Г. Тыминский и Н. А. Салменкова [1965]. На основе данных о коэффициенте диффузии гелия в осадочных породах, равном  $10^{-4} \text{см}^2/\text{сек}$ , и не приводя в своей информации никаких иных параметров расчета, авторы отмечают, что около 10% гелия, образовавшегося в пласте возрастом 100 млн. лет, будет перенесено за счет вертикальной диффузии на расстояние около 10 км. Если принять эти расчеты за основу, то можно будет сделать вывод, что отложения палеозоя, перекрывающие древние платформы слоем осадков со средней мощностью 3—5 км, за время своего существования в 250—400 млн. лет (D — P) пропустили сквозь себя значительную часть потока гелия, поступившего в осадочную толщу из фундамента, т. е. доля глубинного гелия в общем гелиевом балансе осадочной толщи палеозоя достаточно велика.

Противоречивые результаты расчетов, полученные различными исследователями, наглядно иллюстрируют сложность аналитического решения вопросов диффузии гелия сквозь осадочные породы при современной степени изученности теории кинетики газа в недрах и различных параметров, входящих в расчетные уравнения.

Некоторое, весьма ориентировочное, представление о количественной стороне процесса миграции гелия может быть получено с помощью данных о суммарной величине утечки гелия с поверхности Земли.

В соответствии с расчетами, приведенными в гл. IV, интенсивность утечки гелия с  $1 \text{ м}^2$  поверхности Земли составляет в среднем примерно  $6,5 \cdot 10^{-3} \text{см}^3$  гелия в год, или  $3,2 \cdot 10^{12} \text{см}^3$  в год со всей поверхности Земли.

На основе этих данных, а также данных о масштабах дополнительного сингенетического образования гелия в осадочной толще можно рассчитать интенсивность потока гелия, поступающего из фундамента в осадочную толщу.



В расчет принимаем следующие данные, приведенные в гл. IV: удельная гелиепроизводительность осадочной толщи —  $2,7 \cdot 10^{-16}$  г/г, общее образование гелия всей массой осадочных пород —  $31,73 \cdot 10^7$  г/год, или  $1,78 \cdot 10^{12}$  см<sup>3</sup>/год. Объем осадков при расчете принят по Кюнелю, т. е. максимальный. Потеря гелия осадочными породами относительно высокая. Исследования Э. К. Герлингом и В. Г. Хлопиным [1948] известняки показали значительную потерю гелия, колеблющуюся для отдельных образцов от 60 до 95%. В среднем для пород осадочной толщи общие потери гелия могут быть приняты равными 70%.

Общие потери гелия осадочной толщей составляют в соответствии с принятыми параметрами расчетов  $1,25 \cdot 10^{12}$  см<sup>3</sup>/год, тогда как полная потеря гелия землей равна  $3,2 \cdot 10^{12}$  см<sup>3</sup>/год. Следовательно, примерно 40% гелия, ежегодно теряемого Землей, образуется в ее осадочной толще, а 60%, или  $1,95 \cdot 10^{12}$  см<sup>3</sup>/год, гелия поступает из более глубоких недр. Именно этот объем гелия —  $1,95 \cdot 10^{12}$  см<sup>3</sup>/год — и должен считаться транзитным для осадочной толщи коры.

Можно подсчитать, что с каждого 1 м<sup>2</sup> земной поверхности ежегодно переходит в атмосферу  $2,45 \cdot 10^{-3}$  см<sup>3</sup> гелия, образующегося в осадочных отложениях коры и  $3,82 \cdot 10^{-3}$  см<sup>3</sup> гелия, поступающего из более глубоких недр Земли.

Естественно, что указанные потери гелия Землей являются усредненными и меняются в зависимости от структурного положения исследуемого участка. Они различны для океанических впадин, платформ и геосинклиналей. Результаты расчетов хотя и небезынтересны, но их точность невелика вследствие невысокой надежности определения величины общей потери гелия поверхностью Земли, положенной в основу расчетов. Кроме этого, нет никаких оснований утверждать, что гелиевый поток, проходящий сквозь осадочную толщу, является стационарным и что весь гелий, поступающий в осадочную толщу из фундамента, теряется ею в атмосферу. Например, для районов современного мощного осадконакопления более реальным представляется предположение, что глубинный гелиевый поток и до настоящего времени не получил выхода на дневную поверхность.

Значительно более перспективным представляется решение вопроса об интенсивности движения глубинного гелия сквозь осадочную толщу и о его роли в ее общем гелиевом балансе с помощью экспериментальных данных о фоновых концентрациях гелия в разновозрастных осадочных отложениях, удаленных на различные расстояния от пород докембрийского кристаллического фундамента. Естественно, что абсолютного значения эти данные иметь не могут, так как гелиеносность флюидов есть функция многих параметров, однако некоторое представление о закономерностях изменения гелиеносности природных газов в зависимости от их удаленности от фундамента все же может быть получено. Все материалы по этому вопросу и их интерпретация приведены в следующем разделе.

Ниже будет показано, что участие глубинного гелия в его общем балансе в осадочной толще не подлежит сомнению, но вопрос о гипсометрическом положении уровня его активного воздействия остается открытым. Его решение (с относительной степенью достоверности) возможно только для конкретных районов, с достаточно хорошо изученными разрезом отложений и геологической историей их существования.

## § 2. ОСНОВНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ

Количество гелия, накопившегося на том или ином участке недр, является функцией многих переменных, главными среди которых являются длительность и интенсивность процесса гелиенакопления, а также условия сохранения накапливающегося элемента.

Исследование распределения гелия в газовых залежах, выполненное по американским материалам Цартманом, Вассебургом и Рейнольдсом [Zartman, Wasseburg, Reynolds, 1961], а по отечественным — В. В. Тихомировым и А. Н. Вороновым (1967), показало, что распределение гелия хорошо описывается статистической функцией логарифмически нормального распределения, т. е. равновероятными оказываются не абсолютные, а относительные отклонения от математического ожидания, поэтому именно эта функция и была использована для статистической обработки фактического материала.

Рассмотрим данные о наблюдаемых закономерностях в распределении гелия в недрах на основе результатов статистической обработки всего накопленного фактического материала по гелиеносности подземных флюидов.

### Распределение гелия по стратиграфическим горизонтам

Основная зависимость, которая прежде всего обращает на себя внимание при изучении закономерностей распределения гелия, это повышение гелиеносности природных газов при увеличении возраста газомещающих отложений.

Выше нами уже отмечалось, что чем старше стратиграфический возраст отложений, тем больше гелия в составе природных газов. Если свободным газовым залежам третичных отложений свойственны главным образом концентрации гелия, не превышающие 0,010%, то для мезозойских они уже несколько выше — 0,010—0,050% и еще выше для отложений палеозоя —  $\geq 0,050\%$  (табл. 55). На рис. 13 приведены графики зависимости упругости гелия в подземных флюидах от возраста газомещающей толщи. Как видно на графиках, тенденция общего увеличения упругости гелия в подземных флюидах проявляется весьма четко, хотя и отмечаются некоторые отклонения для отдельных стратиграфических систем. Местный характер всех

Таблица 55

Классификация природных газов по степени их гелиеносности с учетом возраста газомещающих отложений

Возраст газомещающих отложений	Степень гелиенасыщенности	Предел концентраций, об. %
Палеоген-неогеновый	Низкая	$< 0,001$
	Средняя	$0,001 - 0,005$
	Повышенная	$0,005 - 0,024$
	Высокая	$\geq 0,025$
Мезозойский	Низкая	$< 0,010$
	Пониженная	$0,010 - 0,019$
	Средняя	$0,020 - 0,049$
	Повышенная	$0,050 - 0,099$
	Высокая	$\geq 0,100$
Палеозойский	Низкая	$< 0,030$
	Пониженная	$0,030 - 0,049$
	Средняя	$0,050 - 0,099$
	Повышенная	$0,100 - 0,999$
	Высокая	$\geq 1,000$

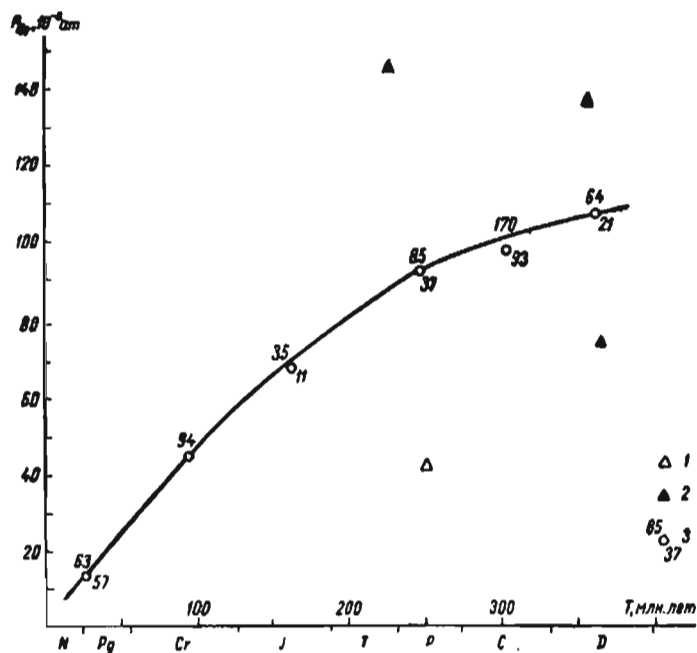


Рис. 13. Распределение величин средней упругости гелия в разновозрастных залежах природных газов (средние данные по СССР и США).

1 — средняя упругость гелия в газовых залежах перми и девона СССР; 2 — то же, в США; 3 — упругость гелия в разновозрастных газовых залежах в среднем по СССР и США, цифра вверху указывает общее число учтенных залежей по СССР, внизу — по США.

этих аномалий становится совершенно очевидным, если построить эти же графики дифференцированно для различных районов мира, например для СССР и США.

На рис. 13 хорошо видно, что некоторое снижение величин средних упругостей гелия в природных газах пермских отложений СССР полностью компенсируется избыточно преувеличенным значением этих же величин для газовых залежей США, тогда как девонской депрессии на кривой упругости гелия в газах США соответствует

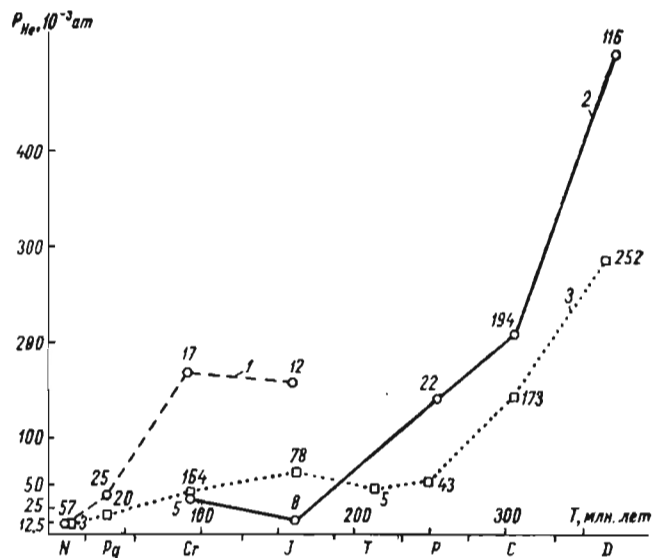


Рис. 14. Распределение величин средней упругости гелия, растворенного в разновозрастных залежах нефти и в пластовых водах СССР.

1 — нефти эпигерцинских платформ; 2 — нефти палеозойских платформ; 3 — пластовые воды. Цифрами обозначено количество учтенных залежей нефти или количество опробованных на воду газонефтяных месторождений.

пик этой величины в газах СССР, а в среднем кривая изменения упругостей гелия в свободных газовых залежах обеих стран плавно поднимается вверх по мере увеличения стратиграфического возраста газомещающей толщи.

Аналогично ведет себя и график изменения упругостей гелия в нефтях и пластовых водах (рис. 14), построенный отдельно для палеозойских и эпигерцинских платформ СССР.

При построении графиков использованы данные по более чем тысяче залежей природных газов и нефти в СССР и США. Такое количество использованного материала позволяет с уверенностью заключить, что упругость гелия в подземных флюидах возрастает с увеличением возраста газомещающей толщи, а имеющие место аномалии носят, как правило, локальный характер.

## Распределение гелия по глубине и мощности осадочной толщи

Другой повсеместно проявляемой закономерностью распределения гелия в недрах является увеличение упругости гелия с возрастанием глубины залегания вмещающих отложений. Естественно, что эта зависимость проявляется при сопоставлении данных по упругости гелия по вертикали только на одном каком-либо геоструктурном участке недр или на различных участках, но в одно-возрастных отложениях. Иными словами, нельзя выявлять закономерность изменения гелиеносности флюидов в зависимости от глубины, сопоставляя данные, например, по третичным газам Сахалина и палеозойским газам Русской платформы, так как в пределах первых километров толщи седиментационных отложений разнообразие геоструктурных и гидрогеологических условий в различных регионах нарушает эту зависимость. Однако на более значительных глубинах земной коры, где воздействие поверхностных факторов прекращается, прямая зависимость между гелиеносностью флюидов и глубиной их подожжения проявляется, по-видимому, достаточно четко.

На рис. 15 приведены данные, иллюстрирующие характер изменения содержания гелия в пластовых водах в зависимости от глубины их залегания для различных регионов СССР. Как видно на графике, в целом для всех выделенных регионов отмечается увеличение общего содержания гелия в пластовых водах по мере увеличения глубины их залегания, более закономерное на территории древней Русской платформы и с аномалиями в отдельных толщах отложений — на молодых, эпигерцинских платформах.

Изменение средней величины упругости гелия в газовых залежах с увеличением глубины их залегания иллюстрируется рис. 16. Как видно из графика, упругость гелия в газовых залежах возрастает с глубиной. Так же, как и для пластовых вод, эта зависимость не является универсальной, и случаи обнаружения на незначительных глубинах газовых залежей, характеризующихся аномально высокими упругостями в них гелия, далеко не единичны. Примеры изменения упругости гелия с глубиной в газовых залежах мезо-кайнозой месторождений СССР приведены на рис. 17. Еще более четко зависимость упругости гелия от глубины проявляется в пределах одного и того же многопластового месторождения. Как правило, чем глубже располагается залежь на таком месторождении, тем выше упругость в ней гелия. Исключения редки и наиболее часто связаны с какими-либо тектоническими нарушениями, способствующими миграции глубинных флюидов в вышележащие отложения.

Таким образом, увеличение содержания и упругости гелия с глубиной является закономерным для подземных флюидов и проявляется как в региональном, так и в локальном масштабах.

В некотором кажущемся противоречии с этим выводом находится уже давно подмеченный факт, что газовые месторождения, вскрыва-

емые на небольших глубинах, характеризуются нередко более высокими концентрациями в них гелия, чем глубоководные залежи. Это отмечалось впервые еще Роджерсом [1921], а затем и В. В. Белоусовым, А. И. Лукашуком, А. Л. Козловым и другими исследователями.

Действительно, наиболее богатые гелием залежи природных газов как в СССР, так и за рубежом обнаружены на глубинах до 500 м, причем наиболее часто на 250—350 м. Исключения из этого

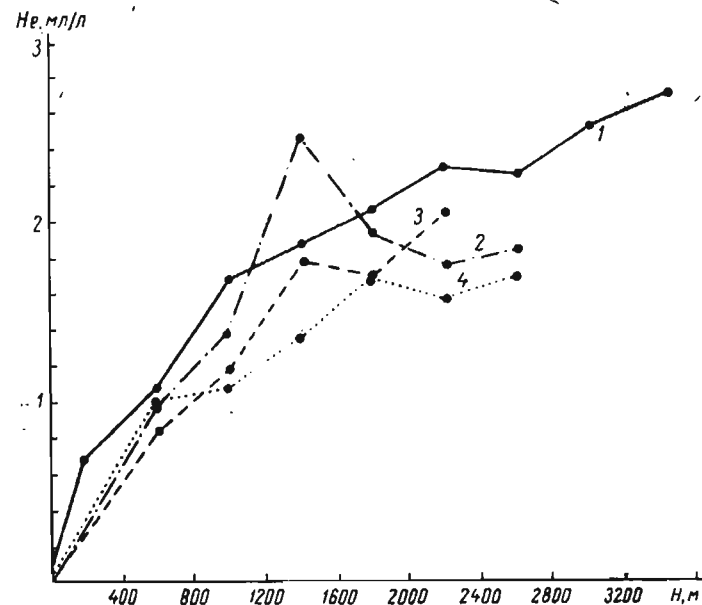


Рис. 15. Изменение содержания гелия в пластовых водах различных регионов СССР в зависимости от глубины их залегания.

1 — пластовые воды Русской платформы; 2 — то же, Северного Предкавказья; 3 — то же, Бузаро-Хивинской области; 4 — то же, Западно-Сибирской платформы (по А. Н. Воронову и В. В. Тихомирову).

правила, конечно, имеются. Так, богатейшая по концентрациям гелия залежь азотного газа на месторождении Раттлснейк (Нью-Мексико, США), содержащая 7,6% гелия, обнаружена на глубине 2100 м. Однако в целом подмеченная многими исследователями обратная зависимость между концентрациями гелия в газовых залежах и глубинами их залегания нередко остается справедливой. Здесь нет никакого противоречия с изложенными данными, так как отмеченная выше закономерность относится к фоновым содержаниям гелия, а газовые месторождения с высокими концентрациями, обнаруживаемые на небольших глубинах, являются аномальными относительно окружающего их фона гелиеносности флюидов. Формируются такие месторождения в результате различных процессов

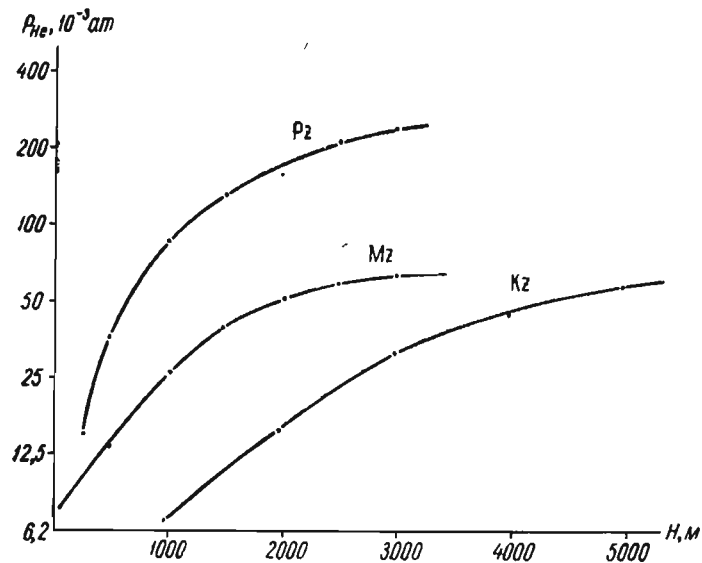


Рис. 16. Изменение упругости гелия в газовых залежах разновозрастных отложений в зависимости от глубины их залегания (по данным СССР и США).

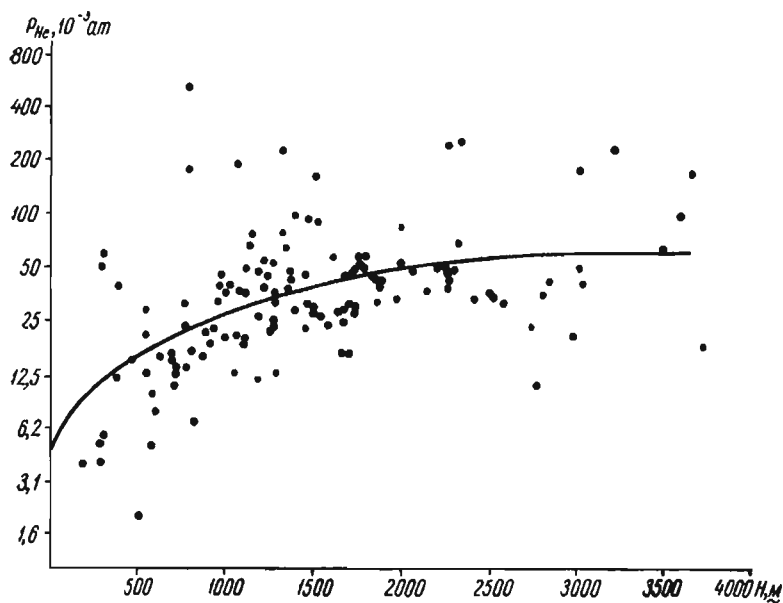


Рис. 17. Распределение величин упругости гелия в природных газах мезо-кайнозой СССР в зависимости от глубины их залегания.

вторичного обогащения гелием газовых залежей, сущность которых рассмотрена подробнее в гл. VII.

Следовательно, расширяя сделанный выше вывод о закономерностях распределения гелия по глубине, можно отметить, что с глубиной общее содержание гелия в подземных флюидах увеличивается, но вероятность обнаружения газовых залежей с аномально высокими концентрациями гелия выше на малых глубинах, чем на больших.

В ряде случаев, особенно при оценке влияния восходящего глубинного гелиевого потока на баланс гелия в седиментационных отложениях, представляется интересным выявление зависимости содержания гелия не столько от глубины залегания исследуемого флюида от поверхности, сколько от его расстояния от фундамента. В этих случаях далеко не безразличны возраст фундамента и общая мощность перекрывающих его осадочных отложений. Чем старше возраст фундамента, тем интенсивнее плотность восходящего гелиевого потока; чем больше мощность осадочных отложений, тем меньше влияние возмущающих поверхностных факторов на общее содержание в них гелия. Интересный материал, свидетельствующий об уменьшении концентраций гелия в природных газах Альберты (Канада) по мере удаления продуктивных горизонтов от кровли докембрийского фундамента, приводит Хитчон [Hitchon, 1963] рис. 18.

Для учета одновременного влияния факторов мощности и глубины можно использовать предложенное Хитчоном отношение, которое может быть названо коэффициентом положения  $K$ , характеризующим удаленность точки исследования как от атмосферы, так и от фундамента

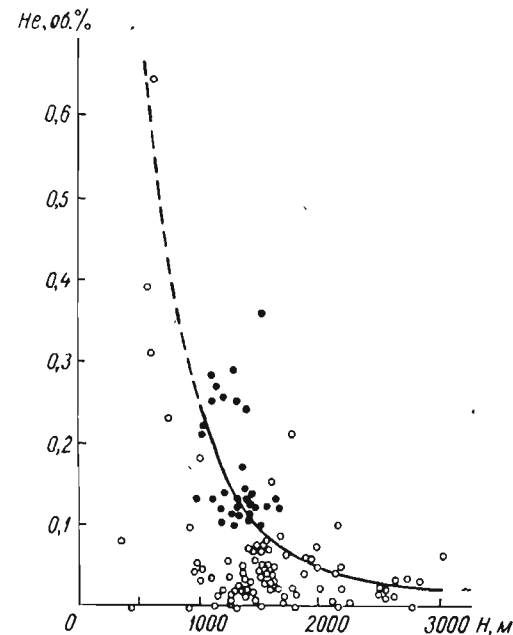


Рис. 18. График зависимости содержания гелия в природных газах Альберты от расстояния ( $H$ ) продуктивных горизонтов от докембрийского фундамента, по Хитчону [Hitchon, 1963].

1 — природные газы свода Суитграсс, оси бассейна Альберта и свода Пис Ривер; 2 — природные газы остальных нефтегазоносных районов Альберты.

$$K = \frac{H-h}{H},$$

где  $H$  — глубина залегания фундамента,  $h$  — глубина залегания объекта исследования. С помощью такого коэффициента можно наглядно иллюстрировать характер распределения глубинного потока гелия в седиментационных отложениях, в частности, его стационарность. Однако универсального значения этот коэффициент

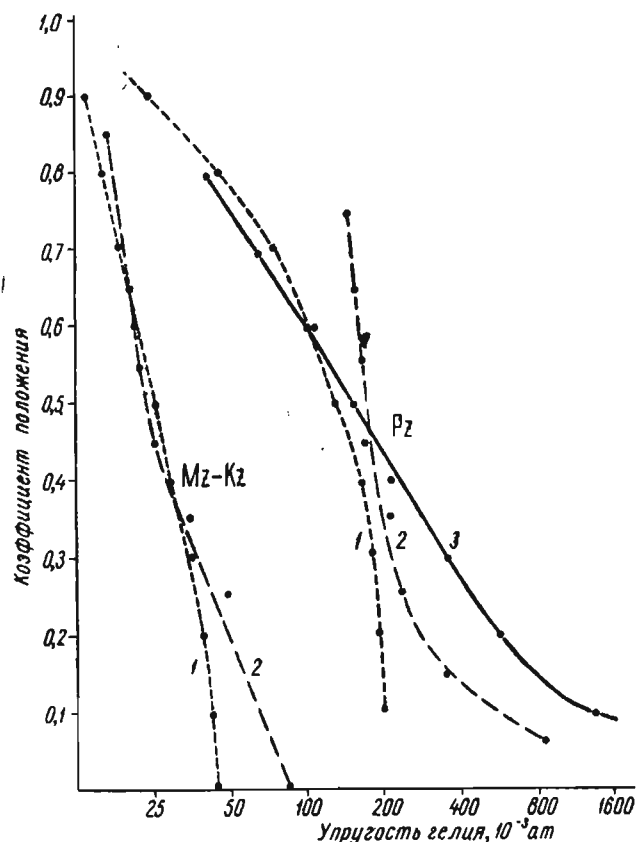


Рис. 19. Изменение упругости гелия в подземных флюидах разновозрастных отложений в зависимости от коэффициента их положения в осадочной толще.

Средние упругости гелия: 1 — в газовых залежах; 2 — в пластовых водах; 3 — в нефтяных залежах.

иметь не может, так как одна и та же величина коэффициента положения, например 0,5, характеризует при различных мощностях осадочной толщи совершенно различную удаленность объекта исследований от граничных параметров. Так, при  $H = 10$  км эта точка будет находиться на расстоянии 5 км от фундамента и поверхности, а при  $H = 1$  км всего в 0,5 км.

Характер статистической зависимости между упругостью гелия и коэффициентом положения иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 19.

Как видно из графиков, увеличение упругости гелия в подземных флюидах по мере уменьшения коэффициента положения, т. е. по мере

приближения к фундаменту, отмечается совершенно четко, причем с большей интенсивностью для отложений палеозоя и с меньшей для мезо-кайнозоя. Последнее легко понять, если учесть, что фундаментом для мезозойских отложений является поверхность метаморфизованной толщи палеозоя, а для палеозойских — докембрия. Если рассчитать эти же соотношения относительно одного и того же докембрийского фундамента, то вполне вероятно, что указанные кривые значительно сблизятся и даже совпадут полностью.

Закономерное увеличение упругости гелия по мере приближения к фундаменту отражает собой одновременное действие сразу трех факторов — увеличения упругости в связи с увеличением возраста отложений, глубины их залегания и усиления воздействия глубинного гелиевого потока, мигрирующего из фундамента. Для того, чтобы иметь возможность дифференцированно учитывать влияние каждого из факторов в отдельности, необходимо производить сопоставление при условии постоянства двух каких-либо из переменных; к тому же должны быть снивелированы и все остальные условия, оказывающие влияние на перераспределение гелия в пространстве.

Имеющиеся в нашем распоряжении данные, удовлетворяющие поставленным условиям, явно недостаточны для применения методов их статистической обработки, поэтому для оценки влияния глубинного гелиевого потока на величину упругости гелия мы воспользуемся данными об удельном приросте упругости гелия в подземных флюидах разновозрастных отложений. Удельный прирост упругости гелия, по В. В. Тихомирову, — это отношение упругости всего накопленного в поровом пространстве гелия к абсолютному возрасту газомещающей толщи. На рис. 20 и 21 приведены данные о среднем удельном приросте упругостей гелия в газовых залежах и пластовых водах в разновозрастных отложениях палеозойской и эпигерцинской платформ СССР в зависимости от коэффициента их положения.

При интерпретации данных, полученных на графиках, необходимо учесть, что во многих случаях для точек, имеющих коэффициент положения, больший 0,5—0,6, характер изменения удельного прироста упругости гелия зависит от влияния активных поверхностных факторов, поэтому достаточно закономерное снижение его величины может свидетельствовать не столько об уменьшении влияния подтока глубинного гелия, сколько о более интенсивных потерях гелия в атмосферу.

В низах осадочной толщи ( $K < 0,5$ ) в подземных флюидах как палеозоя, так и мезозоя отмечается довольно четкое увеличение удельного прироста упругости гелия, хотя и с некоторыми отклонениями на отдельных участках глубин. Последнее можно объяснить соизмеримостью действия внутренних для осадочной толщи факторов гелиенакопления с дополнительным подтоком гелия из фундамента. Иными словами, участие глубинного потока гелия в формировании гелиевого баланса подземных флюидов отложений, прилегающих к фундаменту, существенно, хотя и сопоставимо в ряде случаев с ролью других факторов.

Особенно существенные отклонения отмечаются в юрских отложениях, удельный прирост упругости гелия в которых увеличивается по мере удаления от фундамента (см. рис. 21). Нет возможности уверенно интерпретировать эту зависимость, так как представительность данных по удельному приросту упругости гелия в юрских отложениях непропорциональна (44 залежи вблизи фундамента и всего 7 залежей в средней части осадочной толщи).

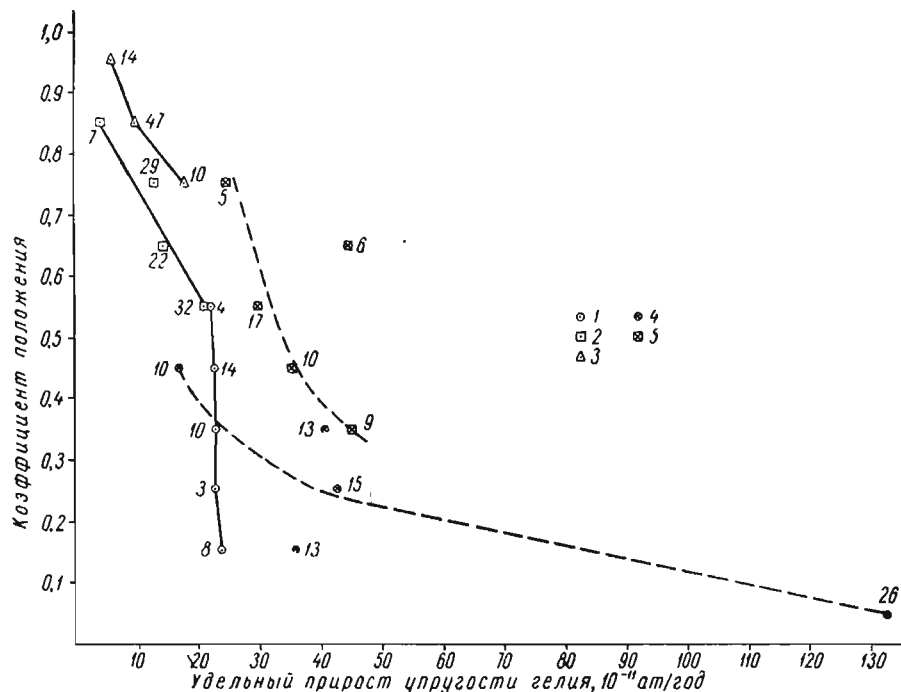


Рис. 20. Изменение удельного прироста упругости гелия в подземных флюидах одноэоарастных отложений палеозоя Русской платформы в зависимости от коэффициента их положения в осадочной толще.

Средний удельный прирост упругости гелия: 1 — в газовых залежах девона; 2 — в газовых залежах карбона; 3 — в газовых залежах перми; 4 — в пластовых водах девона; 5 — в пластовых водах карбона. Цифрами указано число точек, принятых при расчете величины удельного прироста упругости гелия.

Предположив, что выявленная аномалия локальна, можно отметить, что масштабы внутреннего сингенетического гелиенакопления преобладают над внешними эпигенетическими процессами поступления гелия и что роль глубинного гелия в общем гелиевом балансе флюидов такой зоны несущественна. Уместно отметить в связи с этим, что верхнеюрская система является одной из основных урановых эпох на земле [Константинов, Куликова, 1960] и что роль сингенетического гелия для этих отложений может оказаться преобладающей не только в локальном, но и планетарном масштабе.

В целом по обоим графикам, приведенным на рис. 20 и 21, можно отметить, что увеличение прироста упругости гелия по мере приближения к поверхности фундамента достаточно четко отмечается для пластовых вод и значительно менее ясно для газовых залежей, что связано, по-видимому, как с более высокой миграционной способностью газов, так и с более существенной ролью для них внутренних факторов гелиенакопления.

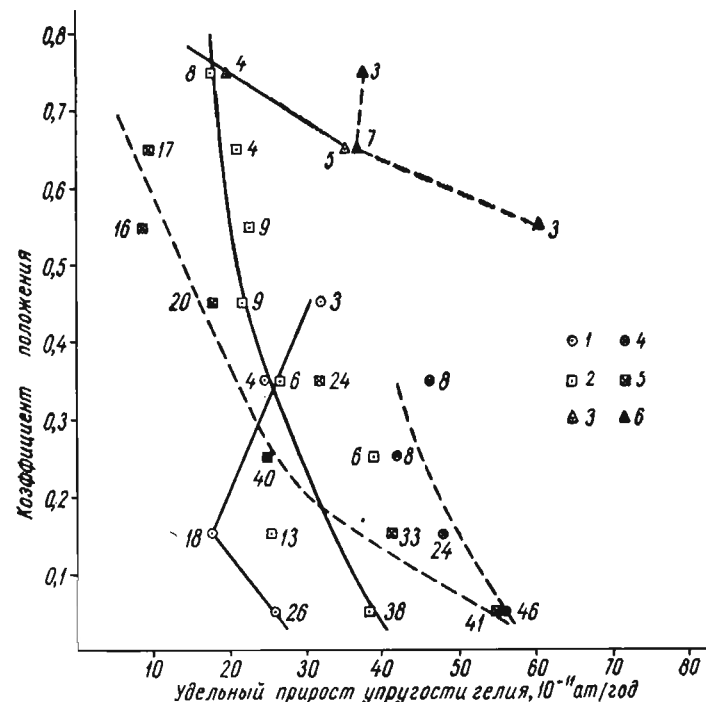


Рис. 21. Изменение удельного прироста гелия в подземных флюидах одноэоарастных отложений мезо-кайнозоя в зависимости от коэффициента их положения в осадочной толще.

Средний удельный прирост гелия: 1 — в газовых залежах юры; 2 — в газовых залежах мела; 3 — в газовых залежах палеогена; 4 — в пластовых водах юры; 5 — в пластовых водах мела; 6 — в пластовых водах палеогена. Цифрами указано число точек, принятых при расчете величины удельного прироста упругости гелия.

Вполне вероятно, что в отдельных районах мира, в частности на некоторых участках Африканской платформы, а возможно и Северо-Американской, будут выявлены значительно более четкие прямые зависимости величины удельного прироста упругости гелия от коэффициента положения объекта исследования в осадочной толще. В таких случаях можно будет сделать вывод, что восходящий глубинный поток гелия полностью контролирует распределение гелия в подземных флюидах седиментационных отложений.

Приведенные данные свидетельствуют о необходимости дифференцированного подхода к оценке роли различных факторов гелие-накопления на различных участках недр.

### Распределение гелия в зависимости от гидрогеологических условий

Необходимо учитывать еще один фактор при исследовании геологических закономерностей распределения гелия в недрах — гидрогеологические условия существования флюидов как современные, так и древние. Для его характеристики должны использоваться данные о характере и интенсивности водообмена в изучаемой части толщи. Необходимость учета данных о гидродинамике обусловлена тем, что условия сохранения накапливаемого гелия в значительной мере определяются интенсивностью водообмена в изучаемой части отложений.

Как правило, независимо от геологического возраста отложения, находящиеся в зоне активного водообмена, характеризуются низкими фоновыми содержаниями и упругостями гелия в насыщающих их флюидах.

В зависимости от геолого-тектонических условий мощности зоны активного водообмена на различных участках неодинаковы. Они больше в областях повышенных гипсометрических отметок, т. е. в областях питания водоносных горизонтов, и меньше в областях пониженных отметок, т. е. в областях стока. В среднем зона активного водообмена распространяется до глубин 200—500 м, опускаясь глубже в горно-складчатых областях, а также в районах, поверхностные толщи которых сложены высокопроницаемыми разностями пород.

Однако из этого правила имеются и исключения. Так, на участках интенсивного образования или поступления гелия, например на урановых месторождениях или в зоне глубоких флюидопроводящих сбросов, нередко обнаруживаются аномально высокие концентрации гелия даже в зоне активного водообмена. В зоне практического отсутствия водообмена, т. е. в зоне застойных вод, где продолжительность гидрогеологического цикла соответствует возрасту вмещающих отложений, условия сохранения гелия, поступающего в подземные флюиды, благоприятны. Масштабы миграции гелия в зоне застойных вод определяются главным образом процессами его диффузии, т. е. самыми медленными из процессов его движения и только на отдельных участках (при наличии условий для вертикальной разгрузки подземных флюидов) возможны повышенные потери гелия.

Благоприятные условия сохранения накапливаемого гелия в зонах застойных вод способствуют (при достаточно длительном и интенсивном поступлении гелия) формированию в них повышенной фоновой упругости гелия.

Зона мало подвижных вод по условиям сохранения гелия занимает промежуточное положение между этими двумя крайними гидродинамическими зонами.

### Распределение гелия в зависимости от тектоники

Распределение гелия в осадочной толще в зависимости от тектоники района является в значительной мере производным от рассмотренных выше факторов. Чем больше мощность осадочной толщи, тем меньше влияние глубинного гелия на гелиевый баланс седиментационных отложений; чем меньше возраст вмещающих отложений, тем меньше накопилось в них сингенетичного гелия. Следовательно, в областях глубокого прогибания земной коры и мощного современного осадконакопления не может быть повышенной фоновой гелие-ности подземных флюидов.

Кроме того, осадочным отложениям палеозоя древних платформ свойственна повышенная гелие-ность насыщающих их флюидов причем тем более высокая, чем выше гелиеобразующие способности осадочной толщи и пород фундамента и чем больше гидрогеологическая закрытость недр. В связи с этим наиболее высокая степень фоновой гелие-ности природных газов характерна для отложений палеозоя древних платформ. Содержание гелия в пластовых водах этих отложений в условиях закрытого гидродинамического режима при кларковой радиоактивности составляет в среднем 0,7—1,2 мл/л и выше.

Фоновые концентрации гелия в составе залежей природных газов палеозоя обычно не менее 0,050%, увеличиваются в зависимости от интенсивности масштабов образования гелия в осадочной толще и в породах фундамента до 0,3% и иногда более.

Фоновая гелие-ность подземных флюидов, заполняющих отложения мезозоя эпигерцинских платформ, значительно ниже, в среднем она составляет для пластовых вод кларковых по радиоактивности районов 0,2—0,6 мл/л. Концентрации гелия в составе залежей природных газов в этих районах составляют обычно 0,015—0,025%. Еще ниже содержание гелия в третичных отложениях альпийской геосинклинальной зоны, фоновая гелие-ность заполняющих их подземных вод лишь несколько выше гелие-ности поверхностных вод и составляет в среднем 0,05—0,10 мл/л, а концентрации гелия в природных газах третичных отложений не превышают обычно 0,010%, составляют чаще всего 0,001—0,005% (в сумме с неонем).

Среди различных типов неотектонических регионов несколько особое место занимают межгорные впадины, фоновая гелие-ность газов в которых обычно несколько выше, чем в однообразных отложениях на платформах и в прогибах.

Аномальными по степени гелие-ности флюидов являются обычно зоны активных тектонических нарушений такие, как крупные сбросы, разломы, зоны дробления и т. п. В указанных районах нередко формируются зоны аномально повышенной гелие-ности

за счет гелия, мигрирующего вместе с поднимающимися из глубин флюидами. Чем глубже разлом, чем более древние отложения он вскрывает, тем выше гелиеносность флюидов в окружающей его зоне.

Уникальным примером формирования зон весьма высокой гелиеносности в зоне разломов являются термальные источники вблизи оз. Танганьика в Африке. Необычно высокая гелиеносность выделяемых источниками газов (до 18%) уже отмечалась нами выше.

Для района расположения источников характерна общая высокая радиоактивность древних по возрасту пород, следовательно, условия для продуктивного накопления гелия в целом благоприятны. Но еще более характерна другая особенность его геологического строения — наличие крупнейшего разлома земной коры. Оз. Танганьика лежит на дне глубокой продольной тектонической впадины, входящей в меридиональную полосу грандиозных разломов, протягивающихся от Мертвого моря до устья р. Замбези. Разломы образуют длинные сбросовые впадины — грабены, к одной из которых и приурочено оз. Танганьика.

Установлено, что все эти разломы возникли на сводах обширных вадутый земной коры, медленно поднимавшихся в течение всего мезозоя. Примерно в олигоцене вследствие резких напряжений в поднимающихся сводах образовались крупные разломы вдоль оси поднятий и толщи пород обрушились на значительном протяжении. Естественно, что в районе столь глубокого нарушения целостности пород коры наряду с изобильными лавовыми излияниями нашли себе выход и глубинные флюиды, а вместе с ними и гелий.

Не исключена косвенная связь высокогелиеносных газов источников Танганьики с каналами глубинных разломов. Однако для формирования этих источников вполне достаточно и того мощного подтока глубинного гелия в зону сформировавшейся в районе разломов депрессии, которая, безусловно, имеет здесь место. Нигде в мире нет таких грандиозных тектонических разломов, как в Африке, и одновременно с этим нигде в мире не выявлено столь высокой гелиеносности спонтанных газов, выделяемых поверхностными водными источниками. Спонтанные газы Танганьики являются по степени гелиеносности, безусловно, уникальными, но в целом повышенная гелиеносность спонтанных газов источников подземных вод, приуроченных к зонам сбросов, разломов и других тектонических нарушений — это настолько частое явление, что может быть даже положено в основу метода трассирования зон тектонических нарушений с открытой флюидопроводящей системой.

#### Генетическая взаимосвязь гелиеносности флюидов и радиоактивности пород

Одной из наиболее четко проявляемых закономерностей в распределении гелия в недрах является совпадение в пространстве зон повышенной фоновой гелиеносности подземных флюидов с зонами повышенной урановой минерализации пород. В основе их простран-

ственного совпадения лежит генетическая взаимосвязь между названными элементами. Естественно, что при этом не имеется в виду территориальное совпадение урановых и гелиевых месторождений, так как для первого из них необходима промышленная рудная концентрация, а для второго — наличие газового месторождения, находящегося в контакте с рудными породами длительное время. Такие совпадения в природе хотя и имеются, но единичны. Более характерно пространственное совпадение зон общей повышенной гелиеносности флюидов с зонами рассеянной повышенной радиоактивности как вмещающих, так и подстилающих продуктивную толщу пород.

Анализ закономерностей пространственного размещения геохимических урановых провинций и зон проявления палеозойской нефтегазоносности показал, что на всех участках их территориального совпадения обнаружены либо гелиевые месторождения, либо (при отсутствии промышленной газоносности) газопроявления с повышенным и высоким содержанием гелия.

Все газовые месторождения и газопроявления, содержащие от 1,0% гелия и более, выявлены, как правило, в непосредственной близости от областей повышенной урановой минерализации.

На рис. 22 приведена схематическая карта размещения наиболее активных проявлений гелия ( $He \geq 1,0\%$ ) и урановых провинций. Как видно на карте, все зоны распространения высокогелиеносных газов расположены в районе урановых геохимических провинций или в непосредственной близости от них.

Несмотря на совершенно очевидную пространственную взаимосвязь гелиевых и урановых провинций, прямая зависимость между содержанием в газах гелия и радона отмечается редко (табл. 56). Оба элемента являются продуктами радиораспада, но тяжелый и маложивущий радон ( $T = 3,8$  дня) накапливается только в самой непосредственной близости от источника своего образования, тогда как легкоподвижный и стабильный гелий рассеивается в виде

Таблица 56

Содержание радона в некоторых богатых гелием природных газах (по Фаулю, 1956)

Месторождение	Радон, $10^{-12}$ кюри/л	Гелий, %
Пенхэвдл (Техас, США)	11—700	0,1—1,3
Хьюгтон (Техас, Оклахома, Канзас, США)	10—280	0,36—0,81
Клифсайд (Техас, США)	10—31	1,7—1,9
Тейбл-Мега (Нью-Мексика, США)	5,1	6
Раттлсвейк (Нью-Мексика, США)	<1	7,3—7,8
Питт-Мидоус (Брит. Колумбия, Канада)	540	0,003
Уэлленд (Онтарио, Канада)	51—172	0,11—0,18
Медисин-Хэт (Альберта, Канада)	57—69	0,11—0,13
Ойл-Спрингс энд Петролия (Онтарио, Канада)	4—22	0,14
Брвнд-Онондага (Онтарио, Канада)	131—800	0,25—0,33



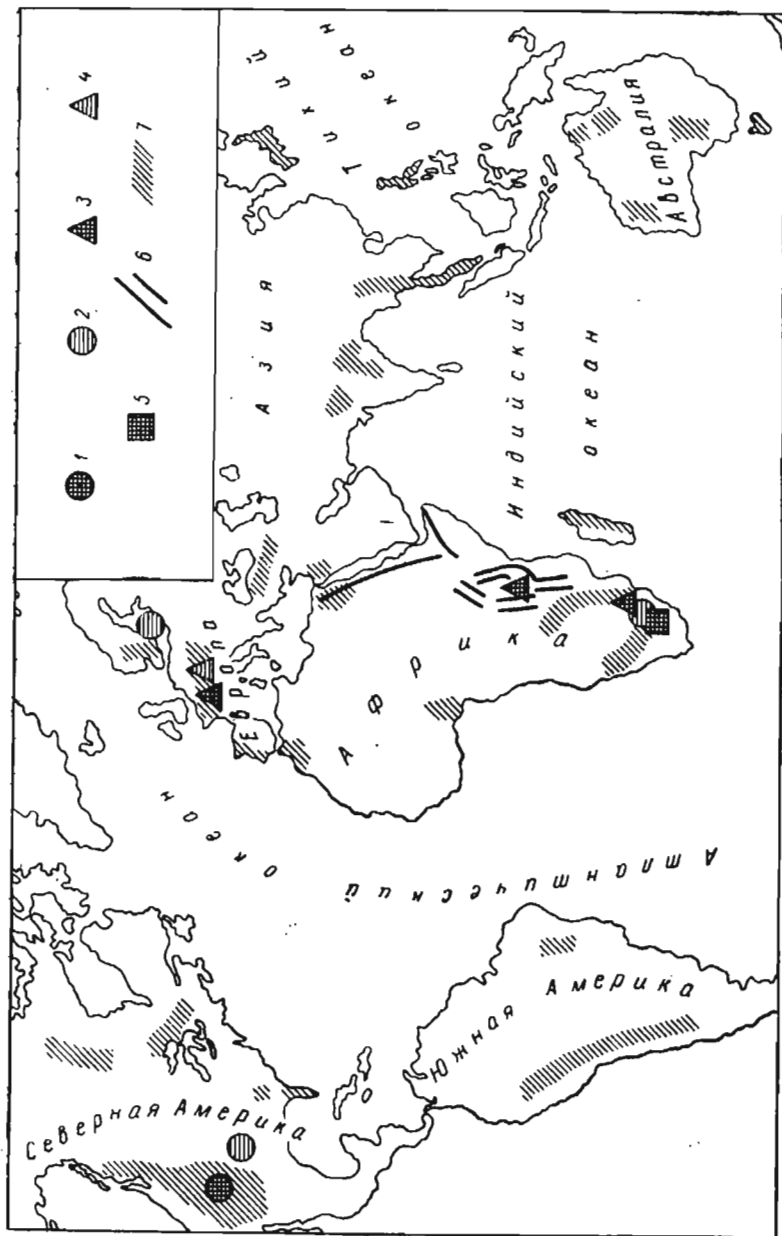


Рис. 22. Схематическая карта размещения наиболее активных гелиегазопроявлений ( $\text{He} > 1,0\%$ ) и урановых провинций мира.

1 — свободные газопроявления с концентрацией гелия  $> 3\%$ ; 2 — то же, с концентрацией гелия от 1,0 до 3,0%; 3 — снеготаняные газопроявления из водных источников с концентрацией гелия  $> 3\%$ ; 4 — то же, с концентрацией гелия от 1 до 3,0%; 5 — рудничное газопроизводство с концентрацией гелия  $> 3\%$ ; 6 — планетарные разломы Восточной Африки; 7 — урановые провинции.

широкого ореола на значительное расстояние от него, создавая общий фон повышенной гелиеносности флюидов.

Вопрос о генетической и пространственной взаимосвязи интенсивных гелиевых и урановых проявлений подробно рассматривался многими исследователями. Следует отметить лишь тот факт, что эта взаимосвязь носит четко выраженный планетарный характер: все гелиевые геохимические провинции обнаруживаются, как правило, в урановых геохимических провинциях. Она обусловлена, по-видимому, геохимическими особенностями состава земной коры в указанных провинциях.

Повышенные концентрации урана и тория в отдельных металлогенических провинциях могут быть объяснены, по А. П. Виноградову [1958], либо начальным составом мантии Земли, обогащенной по какой-либо причине этими элементами, либо разным ходом процессов выплавления ее в отдельных областях, т. е. процессами зонной плавки.

В дальнейшем имеет место лишь перераспределение металла внутри первоначальной металлогенической провинции при процессах эрозии, седиментации и метаморфизма. Следовательно, нередко повышенные концентрации урана и тория в породах фундамента определяют собой и повышенные концентрации этих элементов и в осадочных отложениях. Естественно, что процессы генерации гелия в таких провинциях более интенсивны и определяют собой в конечном итоге формирование на этих же участках коры и геохимических гелиевых провинций.

#### Геохимические особенности состава гелиеносных газов

Выше уже отмечалось, что в связи с низкой упругостью гелий не способен формировать собственные газовые скопления в недрах, он лишь накапливается в других, генетически чуждых ему газовых фазах. Следовательно, гелиеносными могут оказаться газовые залежи любого состава. Данные более 10 тыс. анализов химического состава природных газов показывают, что высокие концентрации гелия ( $> 1\%$ ) обнаруживаются в различных по составу газовых скоплениях как в углеводородных, так и углекислых и азотных, но наиболее часто высокие концентрации гелия ( $> 3\%$ ) характерны для азотных газовых скоплений. Некоторые сведения о составе высокогелиеносных углеводородных и азотных газов были приведены нами в табл. 49, 53 и 56, в табл. 57 даны также отдельные сведения о составе высокогелиеносных углекислых газов. Предельные концентрации гелия в залежах углекислых газов значительно ниже, чем в азотных и углеводородных, и не превышают, по имеющимся данным, 2,7%.

Характерно, что чем выше содержание азота в углеводородных газах, тем больше в них гелия. В газах, содержащих менее 5% азота, гелия, как правило, немного. На рис. 23, 24 и 25 приведены графики

Таблица 57

Состав высокогелиеносных газов (об. %) США с повышенным и вы-

Штат	Округ	Месторождение, разведочная площадь	Возраст горизонта, пласта	Глубина опробования, м	Дата опробования
Аризона	—	Дезерт Крик	D	1920	—
То же	Алач	Вост. Баундери			
»	Навайо	Бьютте	C <sub>прs1</sub>	1658	VIII. 1954
		Хиггинс Доум	Ст	1197	II. 1925
Колорадо	Дельта	Блек Каньон	—	123	XII. 1936
Миссисипи	Мэдисон	Вирлилия	Mz?	4593	V. 1951
Монтана	Массельшелл	Ховард Коуле	—	1667	1948
Нью-Мексико	Сан-Хуан	Хогбек	C <sub>м1s</sub>	2333	IX. 1952
То же	То же	Вилдкэт	C <sub>прs1</sub>	2260	XI. 1952
Юта	Эмеря	Вудсайд	P	1040	IX. 1926

с высоким содержанием CO<sub>2</sub>

CH <sub>4</sub>	TU	N <sub>2</sub> +i	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	Ar	He+Ne	Источник сведений
3,1	5,5	22,5	1,1	—	67,8	—	—	—	2,7	Boone [1958]
70,8	3,7	8,6	Следы	0,1	15,4	—	0,0	0,1	1,10	То же
0,0	0,0	20,1	0,4	—	79,5	—	—	—	1,12	Anderson, Hinson [1951]
0,0	2,0	15,6	0,1	—	82,3	—	—	—	1,26	То же
3,4	0,1	0,5	0,1	0,1	95,6	—	—	Следы	0,24	Boone [1958]
3,0	4,0	69,2	0,3	—	23,5	—	—	—	1,16	Anderson, Hinson [1951]
5,8	7,8	60,5	Следы	0,0	20,3	—	—	0,5	5,06	Boone [1958]
49,8	9,3	19,5	0,1	Следы	17,9	—	—	0,3	3,09	То же
0,0	5,7	62,3	0,3	—	31,7	—	—	—	1,31	Anderson, Hinson [1951]

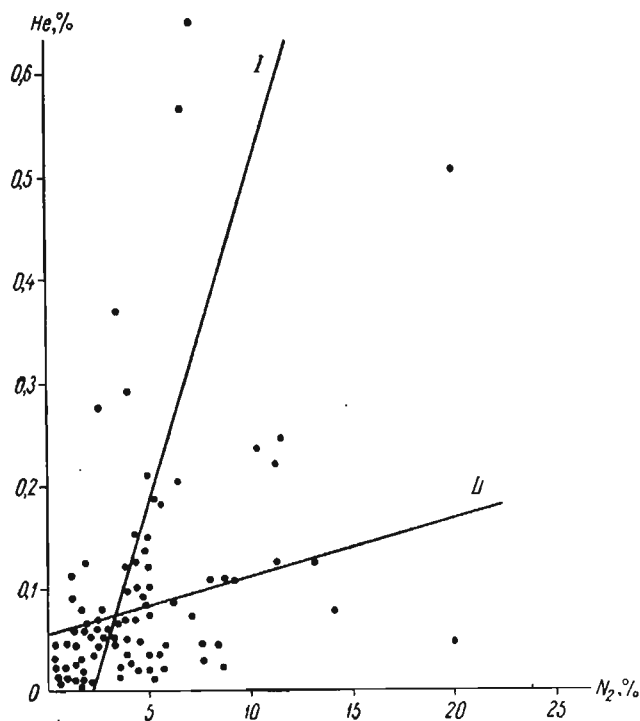


Рис. 23. График зависимости содержания гелия и азота в природных газах Альберты [Hitchon, 1963]

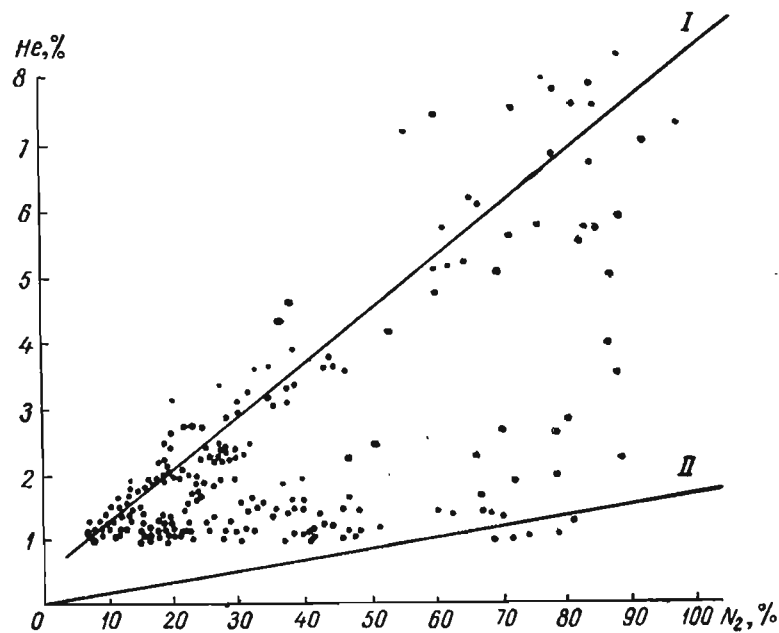


Рис. 24. График зависимости содержания гелия и азота в природных газах США по данным 235 проб газа с содержанием гелия &gt; &gt; 1,0% [Якуцени, 1963].

зависимости между содержанием гелия и азота в природных газах СССР, США и Канады.

Параллельное увеличение содержания гелия и азота в составе углеводородных газов чаще всего отражает процессы вторичного обогащения газовых залежей инертными газами.

В соответствии с гипотезой подземного окисления углеводородов, предложенной В. П. Савченко и А. Л. Козловым [1938], при умень-

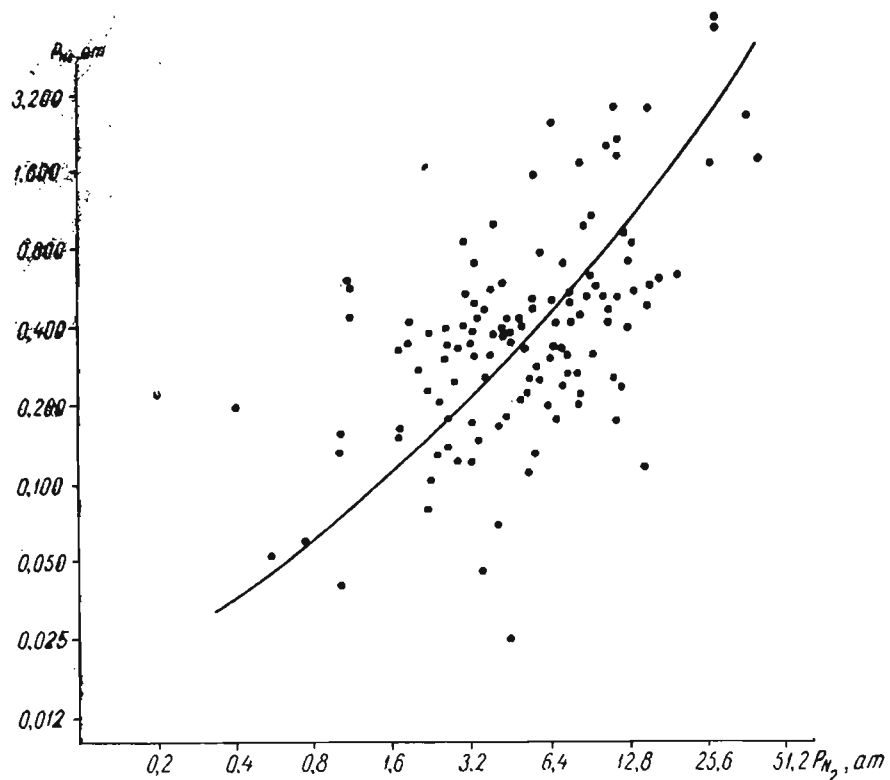


Рис. 25. График зависимости упругости гелия и азота в природных газах мезозоя СССР.

шения объема газовой залежи (за счет биохимического разложения углеводородов) она обогащается инертными компонентами — азотом, аргоном и гелием.

Биохимическое разложение углеводородов в анаэробных условиях не является экспериментально подтвержденным фактом. Однако отклонять гипотезу подземного окисления углеводородов как несостоятельную нет оснований в связи с широко распространенным явлением обнаружения азотных залежей по окраинам нефтегазовых районов. Не исключено, что крайне медленный по характеру

течения процесс биохимического окисления углеводородов все же имеет место в зонах повышенного водообмена, в присутствии сульфатов, растворенных в подземных водах, хотя и не воспроизводится в лабораторной обстановке, вследствие ограниченности длительности эксперимента.

Уменьшение объема газовой залежи может иметь место не только при биохимическом окислении углеводородов, но также и при их растворении в омывающих залежь водах или их термическом разложении при внедрении в продуктивную толщу расплавленных пород в районах проявления молодой вулканической деятельности. Залежи углеводородных газов, содержащие гелий, на участках воздействия высоких температур при внедрении в продуктивную часть толщи интрузий или эффузий могут потерять основную часть углеводородных газов, резко обогатившись, таким образом, инертными компонентами.

Необходимо отметить, что далеко не всегда увеличение содержания гелия в газах сопровождается естественным процессом геохимического старения углеводородных залежей, выражающийся в потере ими углеводородов и остаточном обогащении азотом и гелием. В ряде случаев обогащение гелием углеводородных газов опережает процесс их геохимического старения, в результате высокие концентрации гелия обнаруживаются в молодых залежах углеводородных газов. Так, примерно одинаковое содержание гелия и азота, составляющее около 13% в свободно выделяющихся газах золото-уранового месторождения Витватерсранд в Африке (см. табл. 52), не может быть объяснено остаточным обогащением газов гелием. Совершенно очевидно, что в данном случае приходится иметь дело с интенсивным поступлением гелия в газы, а не с их обогащением гелием за счет потерь других газовых компонентов.

Имеются также и свободные газовые скопления, в которых скорость поступления гелия в залежь опережает процессы ее вторичного обогащения инертными компонентами. На рис. 23 и 24 эта группа газовых скоплений выделяется прямой I.

Как правило, малоазотные высокогелиеносные газы встречаются в районах с повышенной и высокой урановой минерализацией пород. Причем эта закономерность настолько четко выражена, что может быть использована даже как геохимический показатель ураноносности пород района исследования. Анализ фактического материала по составу газов и радиоактивности пород показывает, что предельная величина отношения  $\frac{He}{N_2}$  в составе гелиеносных газов, формирующихся при вторичных процессах обогащения за счет подземного окисления, не превышает обычно 0,01, тогда как в районах с повышенной урановой минерализацией пород величина этого отношения обычно больше 0,01, а в высокоураноносных районах достигает 0,1 и даже иногда выше.

Следует отметить и еще одну геохимическую особенность состава гелиеносных газов углеводородного состава — чем больше в них

Таблица 58

Состав жирных углеводородных газов (об. %) США с высоким со

Штат	Округ	Месторождение, разведочная площадь	Возраст горючего	Интервал перфорации	
				Глубина опробова- ния, м	
Канзас	Барбер	Аллен	0	4449	
	То же	Батон	См — 0	3802	
	»	Коулей	—	2055	
	»	Грахам	С <sub>прис1</sub>	3551	
	»	Квигман	Каннингхам	—	
	»	Павния	Павния Рок	0	3758
	»	Пратт	Каннингхам	0	—
	»	То же	Джука	0	—
	»	Райс	Лионс	0	—
	»	Седвик	Роббинс	—	3280
Оклахома	Симарон	Кейес	С <sub>прис1</sub>	4855	

тяжелых углеводородов, тем меньше гелия, хотя, безусловно, имеют место и исключения, когда высокое содержание гелия отмечается в жирных углеводородных газах (табл. 58).

В целом можно отметить, что высокогелиеносным газам свойствен любой основной состав — азотный, углеводородный и углекислый, но только в районах с высокой насыщенностью отложений радиоактивными элементами. В районах распространения пород, содержание радиоактивных элементов в которых не превышает кларка, высоконасыщенными гелием бывают лишь газы преимущественно азотного состава, т. е. геохимически старые залежи газа.

\* \* \*

На основе рассмотренных данных об образовании и распределении гелия в недрах можно отметить, что фоновая гелиеносность подземных флюидов определяется собственным сингенетичным образованием гелия осадочными породами, интенсивностью восходящего глубинного гелиевого потока и условиями накопления и сохранения гелия в осадочной толще.

Фоновая гелиеносность подземных флюидов зависит от плотности и пористости гелиеобразующих пород, содержания в них радиоактивных элементов, от величины гелиевого геохимического потенциала пород фундамента, мощности и проницаемости перекрывающих его осадочных пород, а также от интенсивности процессов миграции гелия в недрах.

Фоновая гелиеносность подземных флюидов тем выше, чем выше радиоактивность вмещающих и подстилающих пород, чем больше их возраст, чем меньше пористость пород, чем меньше коэффициент положения объекта исследования в осадочной толще ( $K$ ), чем больше глубина его залегания, чем меньше потери гелия за счет миграции и, наконец, чем ниже гидродинамическая активность водообмена в зоне объекта исследования.

держанием гелия [Воопе, 1958]

Дата опробова- ния	СН.	ТУ	N <sub>2</sub> +i	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	He+Ne
V. 1945	56,2	18,0	25,1	0,4	0,3	1,79
II. 1942	68,2	18,5	12,3	0,5	0,5	1,35
XII. 1934	29,0	16,8	47,0	0,0	7,2	1,59
III. 1942	3,1	25,3	69,9	0,3	1,4	2,61
IV. 1943	61,2	23,3	15,0	0,2	0,3	1,13
IX. 1945	67,9	22,4	9,5	0,0	0,2	1,15
X. 1941	47,7	38,2	13,7	0,2	0,2	1,01
IX. 1942	24,9	43,3	28,8	0,6	2,4	3,30
X. 1941	25,4	38,6	35,5	0,2	0,3	1,78
XI. 1934	12,6	20,6	66,7	0,0	0,1	1,64
VIII. 1946	21,1	38,9	31,1	0,2	8,7	0,92

Высокая фоновая гелиеносность подземных флюидов наблюдается, как правило, в районах распространения осадочных толщ палеозоя, перекрывающих породы докембрийского фундамента преимущественно гранитного состава, характеризующихся повышенным рассеянным содержанием радиоактивных элементов при условии длительного сохранения в осадочной толще закрытого гидродинамического режима.

Локальные зоны с аномальным содержанием гелия формируются за счет вертикальной миграции глубинных флюидов с повышенной гелиеносностью в областях разрывных дислокаций или в зонах литологического замещения водонепроницаемых толщ на проницаемые. Обычно они ограничены в региональном плане, но нередко хорошо прослеживаются по вертикали одновременно в нескольких горизонтах.

Локальные зоны с аномально высоким (низким) содержанием гелия могут формироваться также и в районах с аномально высокой (низкой) радиоактивностью отложений. Отдельные залежи природных газов с аномально высоким содержанием гелия могут образовываться при дифференциальном разгазировании глубинных флюидов, при процессах остаточного обогащения залежей инертными компонентами и т. п.

### § 3. РАЗМЕЩЕНИЕ ЗОН РЕГИОНАЛЬНОГО ГЕЛИЕНАКОПЛЕНИЯ НА ЗЕМЛЕ. ГЕЛИЕВЫЕ ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОВИНЦИИ

На основе данных о гелиеносности природных газов многих из изученных нефтегазосных провинций мира, а также рассмотренных выше закономерностей распределения гелия в недрах можно наметить основные зоны как регионального гелиенакопления, так

и районов, в которых обнаружение залежей гелиеносных газов маловероятно.

Основной предпосылкой при отнесении того или иного района к различным по степени перспективности на гелий регионам будут

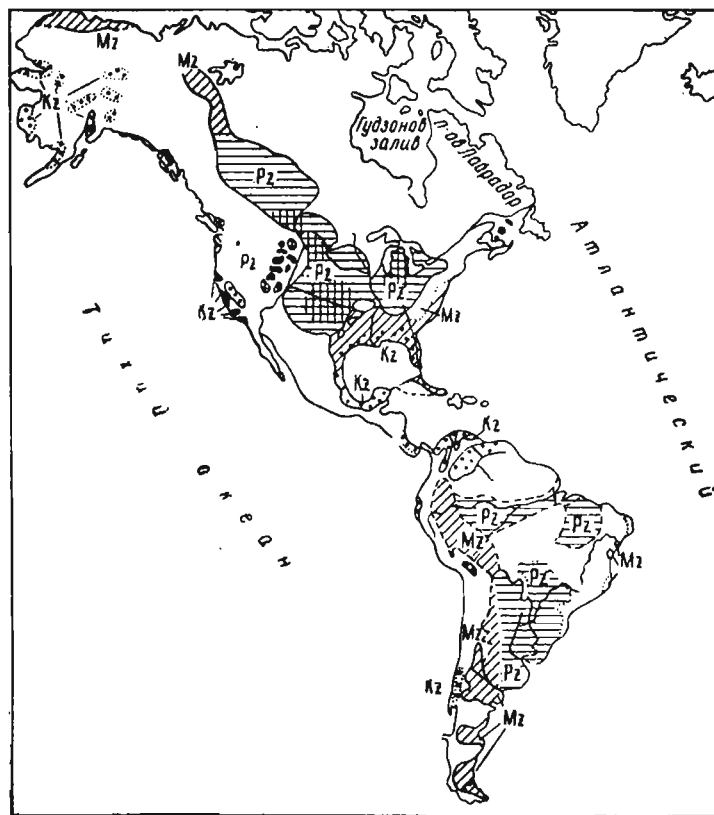
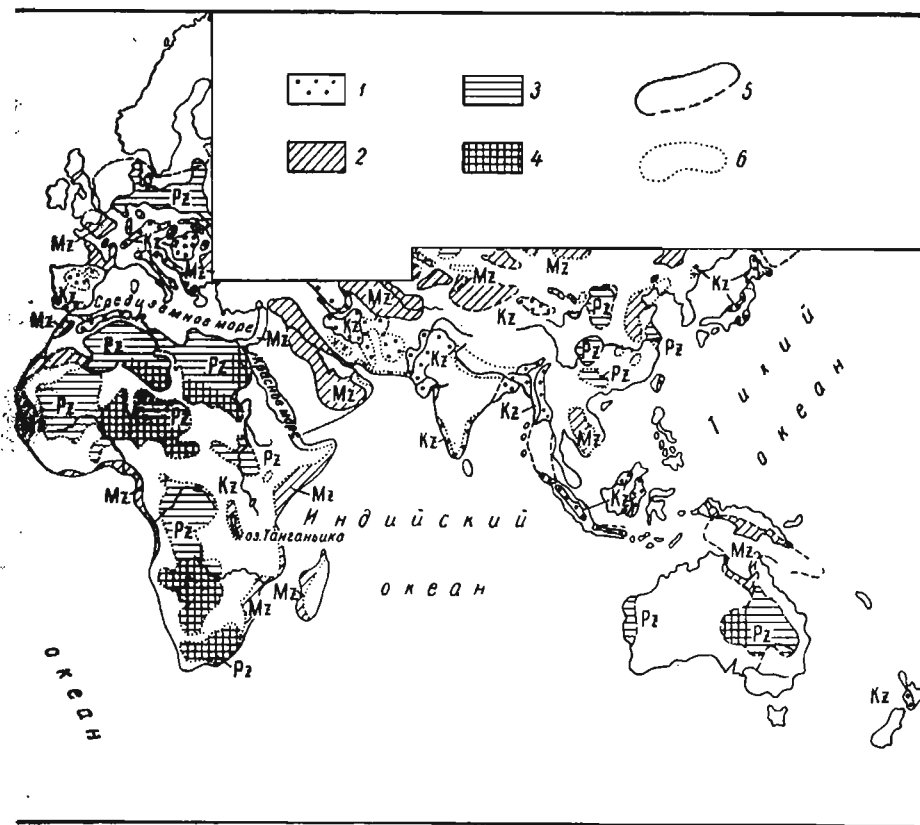


Рис. 26. Карта прогнозной гелиеносности природных газов зарубежных стран. бассейнов земного шара

1 — бассейны преимущественного распространения залежей природных газов с низкой гелиеносностью —  $0,100 > He \geq 0,050\%$ ; 2 — бассейны преимущественного распространения залежей природных газов с повышенной и средней гелиеносностью —  $0,100 > He \geq 0,050\%$ ; 3 — бассейны преимущественного распространения залежей природных газов с повышенной и высокой гелиеносностью —  $He \geq 0,100\%$ ; 4 — зоны внутри бассейнов с преимущественным распространением залежей природных газов с повышенной и высокой гелиеносностью; 5 — установленные и предполагаемые границы нефтегазоносных бассейнов; 6 — границы возможных нефтегазоносных бассейнов; возраст основной продуктивной толщи, по которой

служить следующие основные представления о закономерностях гелиенакопления в недрах. Потенциально благоприятными для продуктивного гелиенакопления являются все нефтегазоносные бассейны палеозойского возраста с тем более высокой гелиенасыщенностью природных газов, чем больше насыщенность радиоактивными элементами пород фундамента, а также осадочной толщи. Наиболее благоприятны при этом районы, нарушенные сбросами, особенно

глубинными, уходящими в фундамент, различные выступы гранитных пород фундамента при особо длительном сохранении нефтегазоносных залежей в условиях высокой гидрогеологической закрытости отложений.



(Составлена на основе карты нефтегазоносных и возможно нефтегазоносных И. О. Брода и др., 1965).

носностью газов —  $He < 0,010\%$ ; 2 — бассейны преимущественного распространения залежей природных газов с повышенной и высокой гелиеносностью —  $He \geq 0,010\%$ ; 3 — бассейны преимущественного распространения залежей природных газов с повышенной и высокой гелиеносностью —  $He \geq 0,010\%$ ; 4 — зоны внутри бассейнов с преимущественным распространением залежей природных газов с повышенной и высокой гелиеносностью; 5 — установленные и предполагаемые границы нефтегазоносных бассейнов; 6 — границы возможных нефтегазоносных бассейнов; Индексами Pz, Mz и Kz указан дана оценка гелиеносности природных газов.

Потенциально неблагоприятными с точки зрения обнаружения залежей гелиеносных газов являются районы третичного нефтегазоаккумуляции, особенно в районах мощного кайнозойского осадконакопления типа Мексиканского залива, Сахалина, Японии и т. п.

На рис. 26 приведена схематическая карта гелиеносности природных газов зарубежных стран, составленная на основе имеющегося фактического материала по данным газовых анализов и выявленных

закономерностей распределения гелия в недрах. В связи с невысокой изученностью гелиеносности природных газов для многих нефтегазоносных бассейнов мира эта закономерность носит в значительной мере приближенный характер.

Основными областями регионального гелиенакопления за рубежом являются центральная часть Северо-Американского континента и значительная часть возможно нефтегазоносных бассейнов Африки.

Содержание гелия в залежах природных газов палеозоя этих районов, как правило, превышает 0,05, а нередко и 0,10%. В зонах повышенной и высокой радиоактивности отложений в этих районах возможно обнаружение зон продуктивного гелиенакопления, содержание гелия в залежах природных газов которых достигает и превышает 0,50%.

Для продуктивных отложений мезозоя характерна пониженная и средняя гелиеносность природных газов (0,01—0,04%), лишь на отдельных участках, при особо благоприятных условиях гелиенакопления, будет отмечаться повышенная и даже весьма повышенная гелиеносность газов. Области кайнозойского нефтегазоаккумуляции, как правило, неперспективны на гелий. Среди неперспективных на гелий районов оказались, в частности, все нефтегазоносные бассейны, входящие в альпийский геосинклинальный пояс, хотя и в этих районах вполне вероятно обнаружение единичных газовых скоплений с повышенной концентрацией гелия.

Обнаружение отдельных залежей гелиеносных газов в зонах, в целом неперспективных или малоперспективных на гелий, наиболее вероятно в районах наличия разрывных дислокаций, способствующих вертикальной миграции глубинных флюидов, а также на участках неглубокого залегания гранитных массивов или прилегающих к выходам кристаллических пород на поверхность, в районах высокой радиоактивности пород, а также в зонах действия вторичных процессов, способствующих обогащению газовых залежей инертными компонентами и в том числе гелием.

Своеобразной особенностью регионального распределения гелия в недрах является приуроченность зон наиболее продуктивного гелиенакопления к весьма ограниченному числу участков. Фактически к настоящему времени за рубежом выявлено только три зоны высокого гелиенакопления — промышленное гелиенакопление на территории палеозойских нефтегазоносных бассейнов центральной части Северной Америки — Северо-Американская зона; гелиенакопление неясного промышленного значения в рудничных газах золоторурановых рудников Южной Африки — Южно-Африканская зона и зона проявления высокогелиенасыщенных спонтанных газов термальных источников Танзании, не имеющая промышленного значения — Центрально-Африканская зона. Именно к этим трем зонам и приурочены основные гелиевые геохимические провинции зарубежных стран.

Гелиевые геохимические провинции — это крупные регионы, на территории которых выявлены многочисленные газопоявления

с высоким содержанием гелия ( $He \geq 1\%$ ). Для них характерна общая повышенная фоновая гелиеносность всех подземных флюидов. При наличии палеозойской нефтегазоносности на таких территориях формируются месторождения гелиеносных газов, содержание гелия в которых нередко превышает 0,5%. Высокая гелиеносность отмечается (хотя и реже) даже в отложениях мезозоя. Общим для всех гелиевых провинций является их совпадение в пространстве с крупнейшими в мире урановыми геохимическими провинциями, причем для тех из районов, в которых урановые провинции совмещаются с палеозойской нефтегазоносностью, отмечаются гелиевые геохимические провинции промышленного значения (Северо-Американская провинция), а для тех из них, в которых нет промышленного нефтегазоаккумуляции, гелиевые провинции не имеют практического значения (Танзания). Как мы уже отмечали, такое совпадение гелиевых и урановых провинций не является случайным и полностью обусловлено их генетической взаимосвязью.

Представляется интересным кратко рассмотреть причины и условия промышленного регионального гелиенакопления на территории Северо-Американской геохимической гелиевой провинции (США и Канада). В состав этой провинции входят нефтегазовые месторождения бассейнов Скалистых Гор и запада Великих Равнин, Мидконтинента и на северо-востоке США — Мичиганского и Иллинойского бассейнов.

Повышенная гелиеносность газов свойственна всем палеозойским газовым залежам этой провинции. Содержание гелия в газах палеозоя превышает обычно 0,1%, но особенно интенсивное гелиенакопление отмечается в двух районах этой провинции — на плато Колорадо и в Мидконтиненте.

На территории первого из них располагаются газовые месторождения с самым высоким содержанием гелия (до 10%), а на территории второго — самые большие запасы гелия в капиталистическом мире. Рассмотрим кратко специфику геологического строения каждого из этих районов с тем, чтобы иметь возможность оценить причины формирования на их территориях уникальных гелиевых месторождений. Нефтегазоносными на плато Колорадо являются отложения палеозоя и мезозоя, вскрытые в многочисленных межгорных бассейнах района. Фундамент впадин докембрийский, выполнены они различными по возрасту отложениями от кембрия до кайнозоя с общей максимальной мощностью, меняющейся в отдельных впадинах от 4,5 до 9—10 тыс. м.

На территории плато Колорадо находится крупнейшая в США и в мире урановая металлогеническая провинция. Повышенная радиоактивность в этом районе свойственна всем отложениям в целом — от докембрия до третичных, но наиболее высокая промышленная рудоносность связана с отложениями юрской формации Моррисон и триасовыми формациями Шайрампи и Чинл. Гелиеносными являются залежи природных газов палеозоя. Высокая концентрация гелия отмечается также и в залежах природных газов триаса, реже в юре и мелу.

Месторождения с самым высоким содержанием гелия до 8—10% обнаружены в районе Четырех Углов, на стыке штатов Юта, Колорадо, Нью-Мексико и Аризона. Среди них в первую очередь выделяются месторождения Раттлснейк (7,8%), Хогбек (5—7%), Тейбл Меаза (5,7%) и несколько южнее них, в штате Аризона — Новайо-Чемберс (8—10%). Сведения о составе газов этих и соседних с ними месторождений гелиеносных газов приведены в табл. 51, их расположение дано на рис. 27.



Рис. 27. Схема расположения гелиевых месторождений плато Колорадо [по Дину и Лауфу, 1961].

Баркер-Крик из верхнемеловых отложений получен углеводородный газ, содержащий 0,07% гелия, 0,60% азота, 12% тяжелых углеводородов [Воупе, 1958]. Для отложений верхнего мезозоя указанное содержание гелия является повышенным (см. табл. 56).

Необходимо обратить внимание и еще на две специфические особенности геологического строения района — значительный по амплитуде тектонический подъем района в целом, начавшийся в период ларамийской складчатости, а также активную экструзивную и интрузивную магматическую деятельность в послеларамийское время.

Приведенных данных о геологическом строении района достаточно для обсуждения вопроса о причинах формирования в этих районах залежей высокогелиеносных газов. В основе их образования лежат следующие основные факторы: 1) высокая радиоактивность

Наиболее высокая гелиеносность обнаружена в газах палеозоя (D — P) и низах мезозоя (T). В газовых залежах юры и мела гелиеносность газов хотя и повышенная (0,07—0,10%), но незначительно, и лишь в отдельных залежах встречены высокие концентрации гелия (Харлей Доум, Ред-Рок, Модель Доум и др.).

На рис. 28 дан геологический профиль через северную часть бассейна Сан-Хуан и бассейн Блэк-Меаза, т. е. через район расположения основных гелиевых месторождений рассматриваемого региона, в частности, на нем же находится и месторождение Раттлснейк, из которого добывается азотный газ со средним содержанием гелия, равным 7,6%. На соседнем с ним месторождении Бар-

осадочных отложений в целом, как рассеянная, так и концентрированная; 2) длительное сохранение нефтегазовых скоплений в отложениях палеозоя внутри замкнутых глубоких седиментационных впадин; 3) активное водействие глубинного гелия, мигрирующего из пород докембрийского кристаллического фундамента во внутренние седиментационные впадины; 4) повышенное относительно кларка содержание радиоактивных элементов в породах фундамента; 5) закрытый гидродинамический режим в течение длительного пе-

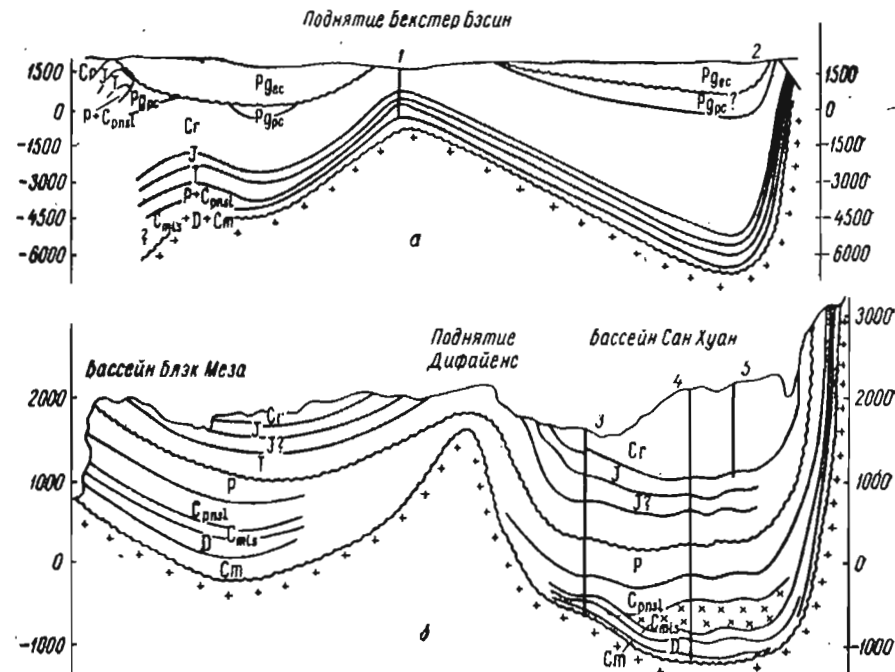


Рис. 28. Геоструктурные разрезы через северную часть бассейна Грин-Ривер (а) и бассейнов Сан Хуан и Блэк Меаза (б) на плато Колорадо [Брод и др., 1965]. Месторождения: 1 — Норд Бекстер Бэсин, 2 — Лост Салджер, 3 — Раттлснейк, 4 — Баркер Крик; 5 — Ред Меаза.

риода для большей части седиментационных отложений впадин, сменившийся в послеларамийское время на режим повышенного водообмена в верхних горизонтах и, наконец, б) активная тектоническая и интрузивная деятельность, способствовавшая интенсивному высвобождению гелия из кристаллических решеток пород фундамента и его миграции в осадочные отложения.

Совместное однонаправленное действие всех этих факторов и привело к формированию в этом районе уникальных по концентрациям гелия залежей природных газов.

На территории Мидконтинента промышленная гелиеносность связана с углеводородными газами палеозоя. Здесь нет залежей

со столь высокими концентрациями гелия, как например, на плато Колорадо, но общие запасы гелия на территории Мидконтинента несопоставимо велики сравнительно с любым другим зарубежным районом. Содержание гелия в природных газах этих районов меняется в пределах 0,4—2,0% (см. табл. 47), расположены они главным образом на территории штатов Канзас, Оклахома и Северный Техас (см. рис. 8).

Продуктивны отложения палеозоя (от кембрия до перми включительно), перекрывающие докембрийский кристаллический фундамент Северо-Американской платформы. Мощность осадочных отложений меняется на различных участках в широких пределах, но в среднем составляет не более 1,5—3,0 км (рис. 29). Многочисленные несогласия, разломы и поднятия фундамента свидетельствуют об его достаточно активных подвижках на протяжении всего палеозоя.

Характерна повышенная радиоактивность как пород фундамента, так и осадочных отложений, хотя и не столь высокая, как на плато Колорадо. Здесь зафиксированы небольшие по запасам урановые месторождения (Пауни Коунти, Семент и Тилман в Оклахоме и др.), многочисленные урановые рудопроявления, особенно в зоне распространения нефтегазовых месторождений [Pierce, Gott, Mytton, 1956].

Основным фактором формирования в газовых залежах Мидконтинента повышенных и высоких концентраций гелия являются, по-видимому, процессы его диффузного поступления в газовые скопления при фазовых взаимодействиях с флюидами повышенной гелиеисности. Общая повышенная гелиеисность подземных вод в районе обусловлена поступлением в осадочную толщу палеозоя глубинного гелия, мигрирующего из пород фундамента, а также длительным процессом собственного сингенетичного накопления гелия.

Дополнительным фактором повышения содержания гелия в залежах газа явились также процессы медленно протекающего биохимического окисления газов вследствие небольшой глубины залегания залежей, около 600—1300 м. Свидетельством наличия этих процессов является повышенное содержание в них азота, составляющее в среднем 20—30% \*.

К юго-востоку и югу от Мидконтинента гелиеисность природных газов постепенно уменьшается. Она еще повышенная в отложениях мезозоя, обрамляющих Пермский бассейн с юго-востока, но становится все меньше и меньше по мере погружения пород фундамента

\* Автор книги придает большое значение подземному биохимическому окислению углеводородных газов. Однако для этого нет оснований. Имеются многочисленные материалы, свидетельствующие о том, что в анаэробных условиях метан — главный компонент углеводородных газов — вообще биохимическому окислению не подвергается. Повышенное же содержание азота в газе может быть обусловлено другими причинами, в частности различным растворением газов. (Прим. ред.).

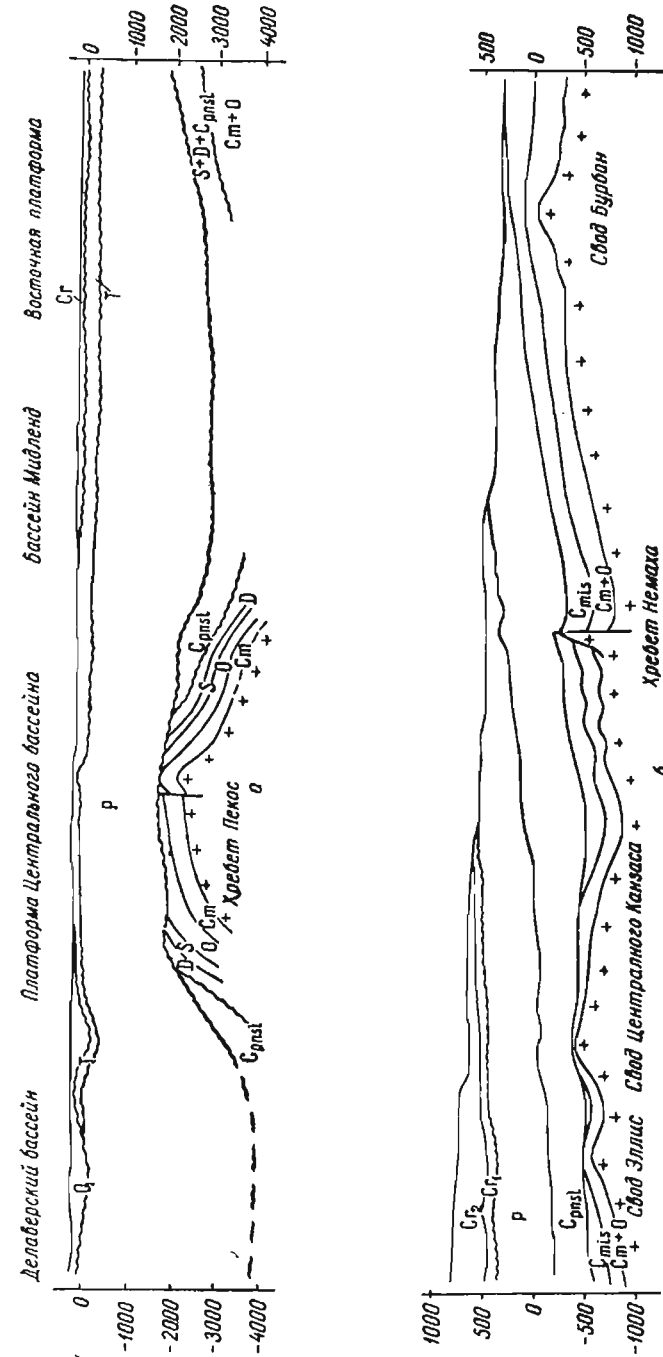


Рис. 29. Геоструктурные разрезы через южную часть пермского бассейна по Нью-Мексико и Техасу (а) и через свод Центрального Канзаса, хр. Немаха и свод Бурбан [Ирдли, 1954].



на значительную глубину. Третичные газы Голф-Коста не гелиеносны (см. рис. 8).

В состав Северо-Американской гелиеносной провинции входят также Иллинойский и Мичиганский бассейны, расположенные на востоке провинции. Гелиеносность природных газов в палеозое здесь несколько ниже, чем в Мидконтиненте, но выше, чем на территории других палеозойских платформ. Здесь имеются единичные залежи газа с высокими концентрациями гелия, но в большей части месторождений гелиеносность природных газов не превышает 0,3—0,5% (см. табл. 47).

В целом в основе причин, обусловивших формирование залежей гелиеносных газов на территории Северо-Американской гелиевой провинции, лежат процессы длительного и интенсивного поступления в седиментационную толщу гелия как сингенетического осадочным породам, так и эпигенетического им.

Колебания в степени гелиеносности газов разновозрастных отложений обусловлены изменениями гелиевого потенциала на локальных участках провинции, связанными как с различиями в содержании радиоактивных элементов по разрезу пород фундамента и осадочных отложений, так и с тектоническими факторами; не последнюю роль при этом играют также и процессы вторичного обогащения залежей гелием.

## Глава VII

### ФОРМИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЕЛИЕНОСНЫХ ГАЗОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Процессы аккумуляции гелия на локальных участках осадочной толщи сложны и далеко не совсем ясны. Гелиевые месторождения имеют тенденцию группироваться в одних районах и отсутствовать в других с аналогичным геологическим строением.

Указывая на дискуссионность современных представлений о закономерностях распределения гелия в осадочной толще, Кук [Cook, 1961] отмечает, что относительно высокие концентрации гелия в природных газах площади, окружающей Амарилло (Техас, США), и некоторых других частей мира не имеют никакого удовлетворительного объяснения. Возможно, гелий — это основной результат радиоактивного распада урана и других элементов в земной коре или мантии, ниже площади гелиевых скважин, но не ясно, почему такое необычно высокое количество гелия аккумуляровалось в столь небольшом месте земной коры?

Рассмотренные закономерности в образовании и дальнейшем перераспределении гелия позволяют оценить условия формирования залежей гелиеносных газов, т. е. залежей с кондиционным содержанием гелия.

Непременным условием промышленного накопления гелия является наличие в недрах газового или нефтяного скопления. Растворимость гелия в различных подземных флюидах неодинакова, в нефти она примерно в 5—7 раз выше, чем в воде, а в газе практически неограниченна. В зависимости от физико-химических свойств флюидов величина растворимости в них гелия меняется. В физической обстановке, соответствующей интервалу глубин 1500—2000 м, относительное равновесие между средами вода — нефть — газ наступает при соотношении содержания в них гелия на единицу объема примерно как 1 : 6 : 70 (см. ниже), поэтому, естественно, что наиболее обогащенными гелием оказываются свободные газовые скопления, а затем нефти.

Исходя из этих данных может быть сделан и практический вывод — наиболее ценным по содержанию гелия сырьем являются газы свободных газовых скоплений, тогда как газы, растворенные в нефтях, т. е. попутные, значительно уступают им по количеству гелия, приходящемуся на единицу объема флюида.

## § 1. ГЕЛИЕВЫЙ БАЛАНС ЗАЛЕЖЕЙ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ

Все многообразие геологических факторов определяется главным образом четырьмя основными из них: начальной обогащенностью гелием сформировавшегося газового скопления, интенсивностью и длительностью последующего поступления в него гелия, а также условиями сохранения накапливающегося гелия в газах.

Общее уравнение гелиевого баланса газовой залежи может быть представлено в следующем виде:

$$\text{He} = \text{He}_{\text{нач}} + \text{He}_{\text{мигр}} + \text{He}_{\text{втор}},$$

где  $\text{He}$  — общее количество гелия в залежи газа;  $\text{He}_{\text{нач}}$  — начальное содержание гелия в газе, с которым он выделился в свободную газовую фазу;  $\text{He}_{\text{мигр}}$  — миграционный гелий, приобретенный или потерянный газом за время его миграции в недрах до поступления в ловушку;  $\text{He}_{\text{втор}}$  — вторичный гелий, приобретенный или потерянный залежью за время ее нахождения в ловушке в результате взаимодействия с вмещающей залежью средой.

Начальное содержание гелия в газе ( $\text{He}_{\text{нач}}$ ) зависит от его происхождения и среды, в которой газ находился в момент его выделения в газовую фазу. Относительно достоверная оценка величины этого элемента гелиевого баланса весьма затруднительна, так как источник и место образования газа, как правило, не известны.

Начальная гелиеносность газов полностью определяется той физико-химической обстановкой, при которой происходило формирование газового скопления. Наши представления о процессах, происходящих в глубинах недр Земли, весьма ориентировочны, можно лишь предполагать, что гелиеносность образующихся газов очень разнообразна — от относительно высокой до низкой. Большое значение имеют при этом и масштабы газогенерации. Если образование газа в зоне реакции шло медленно и в небольших объемах, то гелиеносность формирующегося газового скопления может оказаться высокой. Если процессы генерации газа происходили бурно и в больших масштабах, то гелиеносность таких газов может быть очень мала.

На основе гипотезы органического происхождения газа первичное количество гелия в нем соответствует равновесному количеству гелия в окружающих залежью водах, из которых произошло выделение газов.

Количество миграционного гелия в залежи полностью определится теми процессами взаимодействия газового скопления с вмещающей средой, которые имели место до попадания газа в ту последнюю ловушку, в которой он обнаружен. За время миграции газа его гелиеносность может быть как понижена, так и повышена. В основе изменения компонентного состава мигрирующего газового скопления лежат процессы фазового взаимодействия со средой, через которую оно мигрирует.

Количество вторичного гелия отражает все те изменения в содержании гелия, которые произошли в залежи со времени ее существования в ловушке, как за счет процессов фазовых взаимодействий с контактирующими флюидами, так и за счет дополнительного поступления гелия из пород газомещающего коллектора, образующегося в них при процессах радиоактивного распада.

Количество гелия, поступающего в залежь непосредственно из пород содержащего ее коллектора, определяется временем пребывания залежи в данной ловушке и радиоактивностью вмещающих пород. При этом гелий, поступающий из пород того же коллектора в насыщающие его воды и затем в залежь, в данный элемент баланса не входит, так как его переход в залежь полностью определяется условиями фазового равновесия залежи с водами, механизм которого будет рассмотрен в следующем разделе. Можно показать с помощью элементарного расчета, что объем гелия, поступающего таким путем в газовую залежь, невелик и что за счет гелия, образующегося в породах газосодержащего коллектора (*in situ*), гелиевое месторождение может возникнуть только при весьма оптимальных условиях.

Предположим, что залежь углеводородного газа сформировалась в песчаном коллекторе в пермское время и находится в нем донныне. Пористость пород коллектора около 25%, содержание радиоактивных элементов соответствует кларку, т. е.  $4 \cdot 10^{-6}$  г/г урана и  $6 \cdot 10^{-6}$  г/г тория, объемный вес породы 1,8 г/см<sup>3</sup>. Учитывая, что на 1 м<sup>3</sup> породы приходится при указанных параметрах 8 г урана и 12 г тория, находящихся в равновесии с продуктами распада, можно подсчитать, что за 250 млн. лет при 80% потери гелия породами весь присутствующий в единице объема породы уран и торий образуют 266 см<sup>3</sup> гелия. Если залежь сохранит хотя бы 50% от всего поступившего в нее количества гелия, то в 1 м<sup>3</sup> занимаемого ею коллектора накопится за все время, прошедшее с пермского периода, 133 см<sup>3</sup> гелия.

Если бы газ, заполняющий поры коллектора, находился в нем под давлением, равным атмосферному, то объем поступившего в него гелия составил бы примерно 0,06%, но так как давление в газовой залежи составляет не менее 30 ат, то концентрация гелия в газе, обусловленная его поступлением непосредственно из коллектора, не превысит 0,002%. Естественно, что содержание гелия в газах, заполняющих пористые пространства древних по возрасту рудных пород с высоким содержанием урана, низкими давлениями и высокой степенью закрытости, т. е. при особо благоприятных условиях, как накопления, так и сохранения гелия, может оказаться более значительным.

## § 2. ФАЗОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ГРАНИЦАХ СРЕД

Высокие миграционные свойства гелия позволяют ему легко переходить из одной среды в другую при наличии разностей концентраций, а газовое скопление может при этом как приобретать гелий, так и терять его.

Остановимся подробнее на характеристике механизма фазовых взаимодействий, происходящих в недрах, с тем, чтобы иметь возможность оценить значимость влияния этого явления на устойчивость величины гелиевого баланса залежи при смене физико-химических условий ее существования.

Все изменения содержания различных компонентов, в том числе и гелия, в природных газах как свободных, так и растворенных в нефтях, определяются интенсивностью процессов массообмена, происходящих на границах фаз — твердое тело (породы коллекторов), вода, нефть и газ.

Наибольший практический интерес представляет обсуждение характера поведения гелия на границе разнородных флюидов: вода — газ, вода — нефть и газ — нефть. В их основе лежат одни и те же процессы фазовых взаимодействий между разнородными средами, основное различие — в неодинаковых масштабах процессов перехода гелия в связи с разной его растворимостью.

Принимая во внимание инертность гелия и его чрезвычайно низкую сорбируемость в естественных условиях недр, можно отметить, что во всех случаях его перемещения через границы фаз будет иметь место явление только пассивной диффузии. Скорость диффузии определится при этом градиентом парциальных давлений гелия в граничных средах; направлена диффузия в сторону меньшей упругости.

Процессы, происходящие при нарушенном фазовом равновесии в пограничном диффузионном слое, имеют много общего с кинетикой растворения: у поверхности приемной среды устанавливается концентрация, отвечающая возможной степени насыщения при существующих параметрах, скорость растворения определится величиной диффузионного потенциала на границах сред и характером течения процесса, связанного с динамичностью граничных сред.

Подход растворяющегося гелия к пограничному диффузионному слою и его отход в фазу растворителя происходят путем его диффузии внутри этих сред. Диффузия — это довольно медленный процесс в твердых и жидких телах и относительно быстрый в газах. Коэффициент взаимодиффузии гелия в газе, например в азоте, составляет  $0,70 \text{ см}^2/\text{сек}$  при  $1 \text{ ат}$  и  $0^\circ \text{ С}$ , тогда как в воде он составляет величину, равную примерно  $10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$ . Еще на несколько порядков меньше коэффициент диффузии в твердых телах (см. гл. II). Следовательно, скорость процесса установления равновесия между водной и газовой фазой будет ограничена самым медленным из процессов, т. е. в рассматриваемом случае — его диффузией в воде.

По мере протекания процесса перехода гелия из одной среды в другую его потенциал выравнивается, и в момент наступления равновесия он становится одинаковым во всех сосуществующих фазах, т. е. наступает фазовое равновесие. При равновесии процессы направленной диффузии прекращаются, сохраняется лишь обменная диффузия, не нарушающая фазовых равновесий.

Принимая во внимание, что недра в целом являются открытой термодинамической системой, абсолютно равновесное состояние в гра-

ничных фазах никогда не достигается. Поэтому в естественных условиях существования залежей наиболее часто отмечается лишь их относительно равновесное сосуществование с вмещающей средой.

Скорость установления равновесия между граничными фазами определяется не только величиной градиента упругостей компонента, но также и площадью поверхности соприкосновения фаз, объемами реагирующих масс, постоянством положения фаз относительно друг друга и т. п. Чем больше разница в упругостях гелия в залежи и в воде, чем меньше объем залежи и чем больше площадь ее контакта с вмещающими водами, т. е. чем сложнее структура, тем быстрее при прочих равных условиях наступит ее равновесие. Если граничат неподвижные фазы, например, залежь в условиях высокой гидрогеологической закрытости при отсутствии движения флюидов, то отход растворяющегося гелия в фазу растворителя происходит главным образом путем его диффузии. В этом случае скорость процесса растворения гелия и, следовательно, выравнивание упругостей ограничивается скоростью его диффузии в той из фаз, которая имеет наименьшую ее величину, т. е., например, в воде или в нефти, если они контактируют с газом.

Чем ближе неподвижные граничные фазы к состоянию равновесия, тем медленнее скорость нивелирования их упругостей.

Скорость процесса изменения упругостей в залежи повышается в тех случаях, когда неподвижная газовая залежь подстилается движущимися пластовыми водами. Обусловлено это тем, что диффузионный слой граничных сред постоянно обновляется и градиент концентрации в нем выше, чем в неподвижных средах.

Наиболее высокая скорость достижения равновесия фаз должна наблюдаться при струйной миграции газа (нефти) сквозь воду при условии постоянства параметров системы. Непрерывное перемещение газа внутри водной среды значительно ускоряет процессы массопереноса гелия сквозь подвижную границу взаимодействующих фаз не только благодаря постоянному обновлению диффузионного слоя, но также благодаря явлениям перемешивания — механическому, конвекционному и т. п.

Вопрос о скорости течения процесса выравнивания упругостей гелия в граничных фазах представляет значительный практический интерес. Например, если скорость установления равновесия велика в геологическом понятии о времени, то особое внимание при поисковых работах на гелий следует уделять изучению упругости гелия в пластовых водах продуктивных отложений. Если уравнивание системы происходит весьма медленно, то фактор упругости гелия в водах не имеет решающего значения, так как вероятность обнаружения залежей с аномальной газоносностью в этом случае значительно выше, чем в первом. Однако дать количественную оценку длительности этого процесса в настоящее время не представляется возможным, как в связи с недостаточной изученностью вопросов теории кинетики гетерогенных процессов, так и в связи с широким

многообразием возможных в естественных условиях недр типов систем и их параметров.

Можно лишь отметить, что продолжительность уравнивания граничных фаз системы является функцией компонентного состава и физико-химических свойств каждой из граничных фаз, градиентов упругостей между ними, температуры, давления, объемов реагирующих масс, площади и формы их контакта, динамической характеристики системы и т. п.

Разница в величинах растворимости гелия в различных средах при неодинаковых условиях обуславливает и существенные различия не только в скорости установления равновесий между граничными фазами, но также и в величинах соотношений абсолютных концентраций, которые будут достигнуты на границе фаз при их равновесном сосуществовании.

На основе данных о растворимостях можно рассчитать величины соотношений между абсолютными концентрациями гелия в граничных фазах, обеспечивающих их равновесное сосуществование.

По степени экспериментальной изученности необходимых параметров наиболее доступен такой расчет для среды, состоящей из двух фаз: газа (метан в смеси с гелием,  $He = 0$ ) и воды (пресной), т. е. практически для газовой залежи, околунной слабо минерализованными подошвенными водами с температурой не выше  $75^{\circ}C$ . Результаты расчетов приведены в табл. 59.

Как видно из таблицы, чем выше давление, испытываемое системой, тем меньше должна быть разница в абсолютных концентрациях гелия в обеих средах для достижения ими равновесия и, если при температуре  $50^{\circ}C$  и атмосферном давлении газ должен иметь в 117 раз большую концентрацию гелия, чем вода, то при  $400\text{ ат}$  — всего в 57 раз, т. е. по мере увеличения глубины залегающей залежи установление равновесия фаз наступает при меньших градиентах концентрации. Используя все эти зависимости, можно отметить, что с ростом температуры и давления эффективная растворимость гелия в воде непрерывно увеличивается, причем некоторое снижение растворимости, связанное с увеличением минерализации подземных вод, лишь несколько снижает темп увеличения растворимости, а не компенсирует ее.

Таким образом, с глубиной равновесие газовой залежи с вмещающими водами наступает при меньших градиентах концентраций, что уменьшает относительную насыщенность газов гелием сравнительно с приповерхностными условиями при тех же градиентах концентраций.

Мы не располагаем данными, которые позволили бы произвести аналогичный расчет соотношений равновесных концентраций на границе сред вода — нефть, но на основе весьма ограниченных экспериментальных данных можно ориентировочно принять, что растворимость гелия в нефтях примерно в 5—7 раз превышает его растворимость в водах (при  $p = 1\text{ ат}$  и  $t = 15-40^{\circ}C$ ). Следовательно, равновесность граничных сред вода — нефть по гелию

Таблица 59

Соотношения равновесных концентраций гелия на границе фаз газ (смесь метана с гелием,  $He = 1\%$ ) — вода (пресная)

$T, ^{\circ}C$	Давление, ат	Растворимость, $см^3$ на 100 г воды	Коэффициент активности [по Намиоту, 1963]	Эффективная растворимость, $см^3$ на 100 г воды	Объем * гелия, растворенного в воде, $см^3$	$He_{газа}/He_{воды}$
25	1	0,0085	1,00	0,0085	0,0085	118
	100	0,8491	1,54	1,3076	0,0131	76
	200	1,688	2,21	3,7305	0,0186	54
	300	2,478	2,63	6,6410	0,0221	45
	400	3,241	2,88	9,1720	0,0228	44
50	1	0,0086	1,00	0,0086	0,0086	116
	100	0,8827	1,32	1,1652	0,0117	86
	200	1,734	1,75	3,0345	0,0152	66
	300	2,552	2,00	5,104	0,0170	59
	400	3,358	2,11	7,0854	0,0165	57
75	1	0,0095	1,00	0,0095	0,0095	105
	100	0,9699	1,20	1,1639	0,0116	87
	200	1,907	1,49	2,8414	0,0142	70
	300	2,805	1,68	4,7124	0,0157	64
	400	3,666	1,77	6,4888	0,0162	62

\* Равновесный объем гелия ( $см^3$ ), растворенный в воде, приходящийся на 1  $см^3$  гелия газовой фазы.

наступает при значительно меньших градиентах концентраций, чем для граничных сред вода — газ, что обуславливает и значительно меньшую гелиенасыщенность нефтей сравнительно со свободной газовой фазой (при прочих равных условиях).

Равновесное или близкое к нему состояние системы может сохраняться сколь угодно длительное время при постоянстве внешних воздействий. Но изменение величины любого из параметров состояния системы в любой из фаз немедленно сказывается на ее равновесии. Причины, вызывающие нарушение фазовых равновесий, многообразны и могут определяться как изменениями компонентного состава фаз, так и физико-химической обстановкой их существования.

Нарушения фазовых равновесий могут произойти вследствие тектонических подвижек осадочных пород (подъем, опускание), при которых изменяются давление и температура среды, либо вследствие миграции залежи в новую для нее не только физическую, но и химическую обстановку недр, при поступлении новых объемов газа в залежь путем его миграции и т. п.

Фактический материал по равновесию в системах газ — нефть — вода (рис. 30) свидетельствует, что скорости установления фазового равновесия в целом соизмеримы со скоростью процессов, вызывающих неравновесие. Характерно, что на границе фаз газ — вода упругости гелия в воде часто несколько выше, чем в газах, т. е.

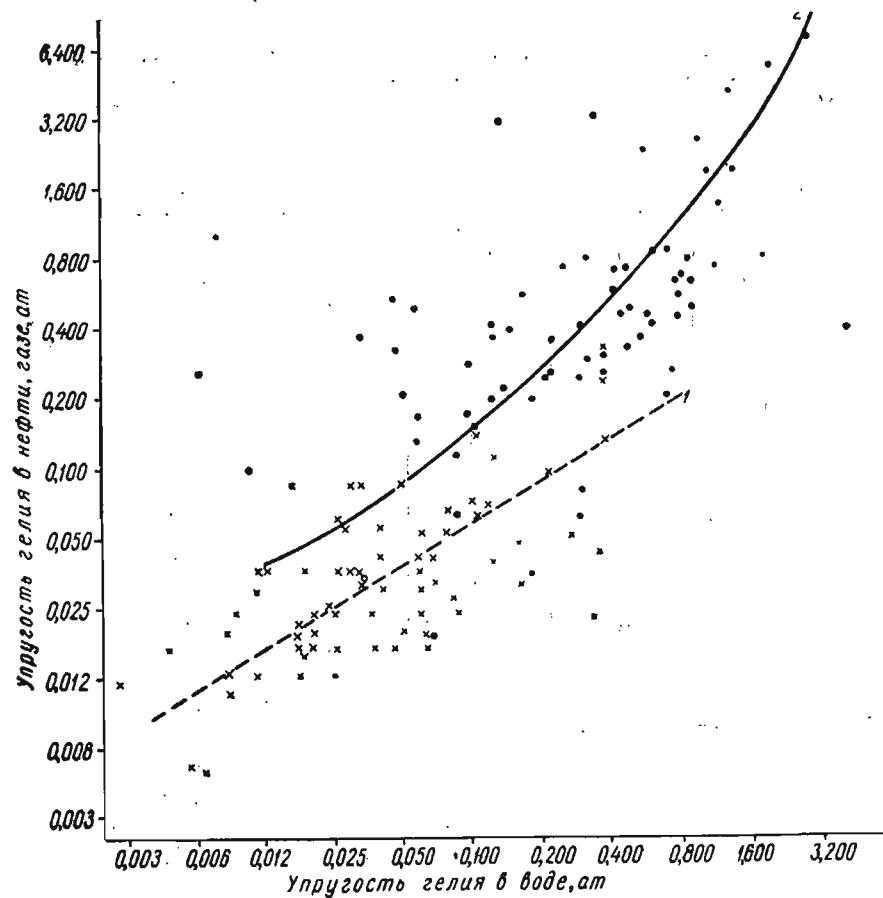


Рис. 30. Соотношение упругости гелия в газовых и нефтяных залежах с упругостью гелия в законтурных водах.  
1 — газовые залежи; 2 — нефтяные залежи.

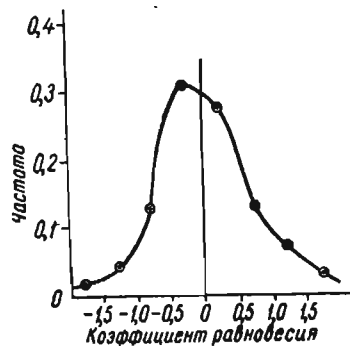


Рис. 31. Распределение коэффициентов равновесия в системе газ — вода (нулю на графике соответствуют случаи равновесия).

случаи незначительного неравновесия газовых залежей с вмещающими водами нередки.

Представление о распространенности случаев равновесия может быть получено с помощью графика распределения коэффициентов равновесия (рис. 31). За коэффициент равновесия (по В. В. Тихомирову) принят натуральный логарифм отношений упругости гелия в газе к упругости гелия в воде. Оба графика свидетельствуют о преобладании в естественных условиях недр систем, близких к равновесию.

Процессы, приводящие к нарушению равновесного состояния залежи с водой, могут быть обусловлены многими причинами, но следствием их может быть только два неравновесных состояния системы: либо упругость гелия в залежи становится меньше упругости гелия в воде, и залежь начинает аккумулировать гелий, либо упругость гелия в залежи больше, чем в воде, и гелий рассеивается из залежи. С точки зрения геологических представлений в первом случае мы будем иметь дело с формирующимся месторождением газоносных газов, во втором — с разрушающимся. Интенсивность и продолжительность этих процессов и определяет их продуктивность.

### § 3. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ ГЕЛИЕНОСНЫХ ГАЗОВ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Анализ основных составляющих компонентов гелиевого баланса газовых залежей свидетельствует о том, что количество гелия в залежи — это переменная величина, определяемая физико-химическими условиями и обстановкой существования газовой фазы в недрах на протяжении всей ее истории от момента образования до формирования и обнаружения газового скопления в ловушке и его исследования.

Гелиевые месторождения могут формироваться как за счет сингенетичного осадочным отложениям гелия, так и эпигенетичного, мигрирующего из пород фундамента. Газовые залежи могут накапливать гелий за счет его диффузного поступления при процессах фазовых взаимодействий с вмещающими залежь флюидами, но могут обогащаться им при уменьшении общих запасов газа в залежи за счет потери каких-либо других составляющих компонентов.

Промышленные концентрации гелия могут возникнуть в газовом скоплении в самую начальную стадию его образования при процессе выделения газа в самостоятельную фазу, но могут и значительно позже, во время нахождения залежи в ловушке. Все эти различия в источниках, способах, месте и времени основного обогащения залежей гелием необходимо учитывать при решении вопросов о генезисе тех или иных гелиевых месторождений, а следовательно, и при классификации.

Многообразие факторов, способствующих продуктивному гелие-накоплению, определяет собой и многообразие генетических типов

и групп гелиевых месторождений. Поскольку практически весь гелий Земли имеет радиогенное происхождение, то генетическая классификация его месторождений может отражать лишь характеристику направленности процессов, приводящих к продуктивному гелиенакоплению в залежах.

По источникам основного обогащения залежей гелием могут быть выделены три основных генетических типа гелиевых месторождений: сингенетичный, эпигенетичный и смешанный.

Для сингенетичного типа залежей основным источником гелия служат процессы  $\alpha$ -распада в осадочных отложениях, как вмещающих продуктивную толщу, так и подстилающих ее. В зависимости от степени интенсивности процесса генерации гелия внутри этого типа месторождений могут быть выделены две группы месторождений — кларковая и продуктивная. Первые из них формируются в районах, в которых обогащенность радиоактивными элементами осадочной толщи соответствует кларковой. Продуктивность процессов накопления гелия определяется для них главным образом их длительностью, т. е. возрастом продуктивных коллекторов. Месторождения этой группы обычно характеризуются небольшой величиной фоновой гелиеносности подземных флюидов. Обнаруживаются они, как правило, в отложениях палеозоя платформенных областей. В третичных и мезозойских отложениях эта группа месторождений гелиеносных газов не встречается в связи с низкими величинами их фоновой гелиеносности, обусловленной недостаточной продолжительностью процессов сингенетичного гелиенакопления.

Залежи гелиеносных газов продуктивной группы формируются в районах, отличающихся аномально высокой радиоактивностью вмещающих отложений. Образование месторождений этой группы имеет место главным образом внутри урановых геохимических провинций. Так же, как и для кларковой группы залежи, большое значение имеет геологический возраст вмещающих пород. Однако диапазон отложений, перспективных с точки зрения обнаружения месторождений продуктивной группы, несколько шире, чем кларковой, и включает в себя не только отложения палеозоя, но и низы мезозоя.

Основное отличие залежей гелиеносных газов эпигенетичного типа от сингенетичного состоит в том, что их формирование происходит в основном за счет гелия, поступающего из пород кристаллического фундамента. Чем древнее фундамент, тем выше содержание в нем радиоактивных элементов, и чем интенсивнее происходящие в нем тектонические процессы, тем выше плотность восходящего глубинного гелиевого потока, тем значительнее его роль в общем гелиевом балансе осадочной толщи.

В эпигенетичном типе гелиевых месторождений также могут быть выделены продуктивная и кларковая группы. Месторождения продуктивной группы характерны для районов с повышенной и высокой радиоактивностью пород фундамента, кларковой — где радио-

активность пород фундамента соответствует средней для данного типа пород.

Высота зоны его внедрения в осадочную толщу неограничена, так как в основе распространения глубинного гелиевого потока в осадочную толщу лежат процессы его диффузии, т. е. в сущности довольно медленные процессы. Граница зоны распространения глубинного гелиевого потока в осадочную толщу определяется ее возрастом, мощностью и литолого-фациальной характеристикой (см. гл. VI).

Формирование повышенной фоновой гелиеносности подземных флюидов за счет глубинного гелия, а вместе с нею и эпигенетичного типа гелиевых месторождений возможно только в наиболее древних по возрасту осадочных отложениях на расстоянии, по-видимому, не более 1,0—1,5 км от пород докембрийского фундамента при условии высокой степени гидрогеологической закрытости продуктивных отложений. Формирование месторождений этого типа в отложениях, перекрывающих более молодой по возрасту фундамент, возможно только в зоне наличия глубоких открытых тектонических разломов, облегчающих миграцию гелия в осадочные отложения и вместе с этим способствующих формированию в них локальной зоны повышенной гелиеносности флюидов. В районах интенсивного третичного осадконакопления обнаружение залежей этой группы невозможно в связи с отставанием скорости распространения восходящего гелиевого потока от скорости осадконакопления.

Месторождения гелия смешанного генетического типа формируются в районах, фоновая гелиеносность подземных флюидов в которых обусловлена примерно равноценным участием обоих рассмотренных элементов гелиевого баланса.

По способу продуктивного обогащения гелием залежей природных газов выделяются диффузный, дегазационный, остаточный и смешанный типы гелиевых месторождений.

Формирование гелиевых месторождений диффузного типа происходит за счет диффузии гелия в залежь, как из пород газосодержащего коллектора, так и главным образом из вмещающих залежь флюидов.

Гелиевые месторождения диффузного типа формируются обычно в условиях повышенной фоновой упругости гелия, в процессе длительного сохранения газовых залежей в древних по возрасту коллекторах, представляющих собой закрытые гидродинамические системы.

Гелиевые месторождения дегазационного типа формируются в результате значительного изменения параметров физико-химического состояния фазовых систем. В основе факторов, обеспечивающих формирование залежей этого типа, лежат процессы дифференциального спонтанного дегазирования подземных флюидов.

Вследствие восходящих тектонических подвижек или миграции глубинных флюидов по тектоническим нарушениям в вышележащие горизонты в связи с уменьшением температуры и давления величина растворимости в них газов существенно уменьшается и весь

избыточный относительно новых физических условий газ выделяется в газовую залежь.

Низкая упругость, характерная обычно для гелия, не позволит ему выделиться в самостоятельную газовую фазу в условиях обычных пластовых давлений, но в процессе общей дегазации флюидов газовые пузырьки обогащаются гелием.

К гелиевым месторождениям этого типа могут быть отнесены, в частности, гелиеносные газы газовых шапок, обнаруживаемые над нефтяными залежами. Дегазация нефти при ее избыточной газонасыщенности идет прежде всего за счет наименее растворимых в нефти элементов — азота и гелия. Кроме того, гелиеносность нефтей обычно в 5—7 раз выше, чем пластовых вод; поэтому газовые шапки характеризуются нередко значительно более высокими концентрациями гелия, чем соседние с ними залежи свободных газов.

Гелиевые месторождения остаточного типа формируются в результате процессов, способствующих уменьшению объемов газовых залежей, вследствие каких-либо химических реакций, растворения в пластовых водах или биохимического окисления углеводов, что приводит, как правило, к обогащению остаточной части залежи инертными газами, в том числе и гелием.

В ряде случаев таким путем формируются месторождения с весьма высокой степенью гелиеносности газов, но запасы их обычно невелики, хотя есть и исключения (плато Колорадо, США).

Вторичное обогащение гелием залежей может иметь место в районах с любым геологическим строением, всюду, где происходят процессы изменения объемов газовых залежей в сторону их уменьшения, но особенно благоприятны верхние зоны продуктивных частей разреза, характеризующиеся гидрогеологической раскрытостью и окислительной обстановкой.

Среди залежей остаточного генетического типа по направленности процессов обогащения их гелием выделяются окислительная (азотная), соллютационная и термическая группы.

Залежи гелиеносных газов окислительной группы\* обнаруживаются наиболее часто по окраинам нефтегазоносных бассейнов или внутри них, на участках, характеризующихся гидрогеологической раскрытостью недр в прошлом или настоящем и соответственно неблагоприятными условиями сохранения нефтегазовых скоплений. Как правило, они имеют азотный состав, поэтому могут быть названы также и азотными.

Соллютационная группа залежей гелиеносных газов обязана своим возникновением главным образом процессам растворения отдельных газовых компонентов залежи в подстилающих водах, уносящих их при своем движении.

Термическая группа залежей может быть обнаружена в районах интенсивного вулканизма, современного или древнего. Залежи

углеводородных газов, обогащенные в той или иной мере гелием, на участках воздействия высоких температур при внедрении в осадочную толщу интрузий или эффузий могут потерять при термическом разложении основную часть углеводородных газов, резко обогащаясь инертными компонентами, в том числе и гелием. Следует отметить, что в чистом виде перечисленные типы залежей почти не встречаются. Наиболее продуктивны процессы гелиенакопления в случае последовательного однонаправленного действия целого ряда факторов. Возникающие при этом месторождения гелиеносных газов могут относиться как к какому-нибудь из уже названных основных формационных типов, так и к смешанному типу. Наименование их группы определится при этом двумя главными процессами, определяющими продуктивное гелиенакопление.

подавляющее большинство месторождений гелиеносных газов с наиболее высоким качеством сырья относится именно к смешанному генетическому типу месторождений.

По месту и времени обогащения залежи гелием выделяются следующие типы гелиевых месторождений: 1) первичный — основное количество гелия поступило в залежь во время формирования газовой фазы, т. е. в начальный этап образования газового скопления; 2) миграционный — гелиевый баланс залежи сформировался при процессах взаимодействия мигрирующего газового скопления с окружающей средой в промежуточный этап ее существования от времени формирования газовой фазы до ее поступления в ловушку; 3) вторичный — гелиеносность газов в залежи определялась главным образом различными вторичными процессами ее обогащения гелием за время существования залежи в ловушке, т. е. в конечный этап времени ее существования, и, наконец; 4) смешанный тип, обязанный своим образованием примерно одинаковой интенсивности процессов гелиенакопления на всех стадиях существования газовой фазы или любых двух из них.

Гелиевые месторождения первичного типа формируются обычно при повышенной фоновой упругости гелия в среде, из которой происходит выделение газа в газовую фазу. В естественных условиях недр формирование газовой фазы может иметь место как в твердых породах в результате каких-либо химических реакций или термического воздействия, так и в жидких флюидах — в водах, нефтях, газонасыщенность которых превышает их растворимость. Начальная гелиеносность газов определится при этом упругостью гелия в той среде, в которой происходило формирование газового скопления, а также масштабами газогенерации. Гелий поступает в газовую фазу в равновесном или меньшем равновесного с флюидами соотношении, если выделение газа происходит из флюидов, при спонтанной дегазации вследствие их избыточной газонасыщенности. Избыточное перенасыщение газом флюидов может иметь место как вследствие активных процессов газогенерации, так и вследствие смены физико-химических условий существования флюидов, например, при вертикальном перемещении их за счет восходящих тектонических

\* См. примечание к стр. 172.

Таблица 60

## Классификация гелиевых месторождений

По источнику основного поступления гелия		По способу обогащения гелием залежи		По месту и времени обогащения залежи гелием		По фазовому соотношению залежи с вмещающей средой	
Тип	Источник гелия	Тип	Физическая характеристика процесса гелиенакопления	Тип	Время и место формирования основной части баланса гелия в залежи	Тип	Характеристика взаимоотношения фаз
Сингенетичный	Фоновая гелиеносность природных газов создается за счет процессов альфа-излучения при радиоактивном распаде в седиментационных отложениях	Диффузный	Диффузное поступление гелия в газовую залежь вследствие фазовых взаимодействий с вмещающими флюидами, а также из пород газового коллектора	Первичный	В период формирования газовой фазы	Равновесный (фоновый)	Упругости гелия в границах газовой и водной средах одинаковы и соответствуют фону
Эпигенетичный	Основная гелиеносность природных газов создается главным образом за счет гелия, поступающего в осадочную толщу из пород кристаллического фундамента	Дегазационный (спонтанный)	Спонтанное выделение газа вместе с гелием из газонасыщенных подземных флюидов при их дифференциальном дегазировании	Миграционный	При миграции газовой фазы до ее сбора в ловушке		
		Остаточный	Газовая залежь обогащается гелием за счет изменения ее компонентного состава. Происходит относительное увеличение содержания гелия при уменьшении общих запасов газа за счет потери каких-либо его компонентов	Вторичный	В ловушке	Неравновесный (аномальный)	Упругость гелия в газовой залежи не соответствует фоновой
Смешанный (генетический)	Фоновая гелиеносность создается за счет примерно равноценного поступления гелия как при радиоактивном распаде в осадочной толще, так и при поступлении из пород фундамента	Смешанный (формационный)	Залежь обогащается гелием как за счет его непосредственного поступления, так и за счет процессов изменения компонентного состава	Смешанный (этапный)	Залежь обогащается гелием примерно равноценно при различных этапах ее существования		

подвижек. Если выделение газовой фазы происходит в результате каких-либо химических реакций в породах, то гелий в газовое скопление поступает главным образом благодаря процессам диффузии. Чем интенсивнее процессы газогенерации, тем меньше гелия в составе формирующегося первичного газового скопления. Следовательно, гелиевые месторождения первичного типа могут формироваться

только при замедленных процессах выделения газовой фазы в областях повышенной и высокой упругости гелия.

Гелиевые месторождения миграционного типа формируются главным образом в период промежуточного этапа существования газовой фазы от времени ее возникновения до поступления в ловушку. Основное количество гелия поступает в газ при процессах фазовых



Таблица 64  
Типы гелиевых месторождений

Тип	Группа
<p><b>Фоновый</b></p> <p>Основной источник обогащения залежи гелием — его диффузное поступление из вмещающих залежь пород и флюидов. Залежи обычно равновесны по гелию с вмещающими флюидами. Если фоновая гелиеносность флюидов сформировалась в основном за счет гелия, сингенетичного осадочным толщам, то может быть выделен подтип сингенетичных месторождений, если основной источник формирования фоновой гелиеносности флюидов — глубинный гелий, мигрирующий из пород фундамента, то следует выделять подтип эпигенетичных месторождений. При фоновой гелиеносности, обусловленной равноценным участием сингенетичного и эпигенетичного факторов гелиенакопления, следует выделять по источнику поступления гелия подтип смешанных месторождений</p>	<p>В зависимости от радиометрической характеристики источника основного поступления гелия в каждом из подтипов месторождения могут быть выделены две группы: 1) кларковая — когда количество гелиеобразующих радиоактивных элементов равно среднему их содержанию в соответствующих типах пород; 2) продуктивная — когда количество гелиеобразующих радиоактивных элементов превышает их среднее содержание в соответствующих типах пород</p>
<p><b>Остаточный</b></p> <p>Продуктивное обогащение гелием залежи произошло за счет потери каких-либо других компонентов ее химического состава. Залежь при этом может остаться равновесной по гелию с вмещающими флюидами, но может стать и аномальной из</p>	<p><b>Окислительная</b></p> <p>Обогащение залежи гелием произошло за счет биохимического разложения углеводородов (может быть как фоновой, так и аномальной типа)</p> <p><b>Солютационная</b></p> <p>Обогащение залежи гелием произошло за счет растворения во вмещающих флюидах других компонентов ее химического состава (только аномальной типа)</p> <p><b>Термическая</b></p> <p>Обогащение залежи гелием произошло за счет термического разложения углеводородов внедрившимися в продуктивную часть коллектора расплавленными породами (чаще аномальной типа, но возможен и фоновый)</p>

Продолжение табл. 61

Тип	Группа
<p><b>Миграционный</b></p> <p>Залежь гелиевых газов сформировалась за счет миграции газовой фазы, обогащенной гелием, в вышележащие отложения по дизъюнктивным нарушениям. Залежи обычно неравновесны по гелию с вмещающими флюидами</p>	
<p><b>Дегазационный</b></p> <p>Обогащение гелием залежи произошло за счет дифференциального дегазирования подземных флюидов в результате смены физико-химической обстановки их существования как за счет тектонических подвижек осадочной толщи в целом, так и за счет миграции флюидов по дизъюнктивным нарушениям. Залежи обычно неравновесны по гелию с вмещающими флюидами</p>	
<p><b>Смешанный</b></p> <p>Обогащение залежи гелием произошло за счет действия самых разнообразных процессов продуктивного гелиенакопления. Залежи могут быть как равновесными, так и неравновесными по гелию с вмещающими флюидами</p>	<p>взаимодействий мигрирующего газового скопления с вмещающей средой. В последующем существенного изменения содержания гелия в газах не отмечается.</p> <p>Гелиевые месторождения вторичного типа формируются на заключительном этапе существования газового скопления, во время его нахождения в ловушке главным образом за счет процессов фазовых взаимоотношений залежи с контактирующими флюидами.</p> <p>По отношению к вмещающей среде на гелиевых месторождениях могут быть равновесные и неравновесные залежи. Первые из них находятся в равновесии (по гелию) с вмещающей средой, вторые — аномальной — ей. Процессы, приводящие к формированию залежей, находящихся в неравновесии с вмещающими флюидами, обусловлены многими причинами: изменением физико-химических условий существования залежи вследствие ее миграции, водообмена, поступления новых объемов газа в залежь и т. п. Неравновесные состояния систем могут быть двух типов: если упругость гелия в залежи меньше</p>

упругости гелия в воде, то залежь аккумулирует гелий, при обратном соотношении — залежь рассеивает гелий. В первом случае мы имеем дело с формирующимся месторождением гелиеносных газов, во втором — с разрушающимся.

Сводная классификация различных типов гелиевых месторождений приведена в табл. 60.

На основе изложенного может быть дана также и сводная генетическая классификация основных типов гелиевых месторождений, учитывающая как источник поступления гелия, так и направление процесса накопления гелия.

В соответствии с этой классификацией выделяются четыре основных типа гелиевых месторождений — фоновый, остаточный, миграционный, дегазационный и один дополнительный — смешанный, формирование которого происходит при совместном однонаправленном действии нескольких разных факторов продуктивного гелиенаккопления.

Схема генетической классификации гелиевых месторождений вместе с необходимыми пояснениями к ней дана в табл. 61.

Естественно, что роль каждого из генетических типов гелиевых месторождений в общем балансе залежей гелиеносных газов весьма неодинакова. Наиболее распространены месторождения смешанного и фонового генетических типов. Залежи остаточного типа имеют второстепенное значение среди гелиевых месторождений, причем особенно незаметна роль месторождений термической группы этого типа. Небольшое значение в общем балансе залежей гелиеносных газов имеют также и месторождения миграционного и дегазационного генетических типов (см. гл. VIII).

Необходимо отметить, что наиболее обогащенные гелием залежи природных газов относятся к смешанному типу месторождений, например, высокогелиеносные залежи азотных газов плато Колорадо Северо-Американской гелиевой провинции. Их формирование произошло на базе вторичного обогащения залежей углеводородных газов с высоким фоновым содержанием гелия. В сущности, это тип остаточных гелиевых месторождений, сформированных на базе газовых залежей, обогащенных гелием как за счет процессов генерации гелия в самих осадочных отложениях, так и за счет гелия, поступившего из пород фундамента, т. е. фонового типа смешанного подтипа продуктивной группы.

Залежи гелиеносных природных газов Мидконтинента относятся, по-видимому, в большинстве своем к фоновому типу гелиевых месторождений (смешанного подтипа), сопровождающихся начавшимися процессами вторичного обогащения их гелием, но еще не зашедшими так далеко, чтобы превратить залежи природных газов Мидконтинента в тип остаточных гелиевых месторождений, как это имело место на плато Колорадо.

## Глава VIII

### ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ ГЕЛИЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Несмотря на широкое многообразие естественных гелиевых газопроявлений, их численность резко сокращается при выборе объектов, пригодных для рентабельного извлечения гелия в промышленных масштабах. В настоящее время этим условиям отвечают лишь природные газы как свободных газовых скоплений, так и получаемые попутно при разработке нефтяных месторождений. Однако при изменении конъюнктуры спроса промышленности к этому виду сырья совершенно не исключено, что в переработку с целью извлечения из них гелия будут включены и другие типы газов, такие, как шахтные, рудничные и др.

Все типы газопроявлений как свободных, так и растворенных в твердых породах и природных флюидах, содержащие гелий и принципиально пригодные для извлечения его из них, могут быть подразделены по формам проявления на следующие группы: 1) газы атмосферы; 2) шахтные и рудничные газы; 3) газы, растворенные и окклюдированные в минералах и породах, обогащенных радиоактивными элементами; 4) газы, растворенные в подземных водах; 5) газы, растворенные в нефтях; 6) свободные газовые скопления.

При современном технико-экономическом состоянии гелиевой промышленности и потребности в этом виде сырья извлечение гелия из атмосферного воздуха, из газов, растворенных в подземных водах, из радиоактивных минералов, обогащенных гелием, а также из рудничных и шахтных газов экономически нецелесообразно, из первого — в связи с низким содержанием гелия, из остальных — в связи с незначительностью дебитов газов и техническими трудностями их извлечения.

Углеводородные газы с повышенной и высокой гелиеносностью, добываемые при разработке нефтяных и газовых месторождений, а также азотные газы свободных газовых скоплений, обогащенные гелием, являются в настоящее время единственным видом сырья, обеспечивающим рентабельную добычу гелия в промышленных масштабах. Поэтому из всего многообразия генетических типов естественных гелиевых газопроявлений могут быть выделены всего два типа промышленных месторождений гелия: свободные газовые скопления, обогащенные гелием, и газы, растворенные в нефти, добываемые попутно при разработке нефтяных месторождений, т. е. гелиеносные природные газы и гелиеносные попутные газы.

## § 1. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕЛИЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Гелиевым месторождением следует считать любое месторождение природных газов как свободных, так и растворенных, степень гелие-ности которых отвечает современным требованиям промышлен-ности по рентабельному извлечению из них гелия, а общие запасы газа достаточны для обеспечения сырьем гелиедобывающего пред-приятия в течение амортизационного срока его эксплуатации.

В зависимости от возможностей сырьевой базы каждой из стран в отдельности и их потребностей в гелии требования промышлен-ности к сырью неодинаковы в различных странах. Меняются они также и внутри каждой из стран с течением времени, в зависимости от появления новых областей применения сырья в промышленности. До эпохи дирижаблестроения, т. е. до первой мировой войны, когда гелий использовался главным образом для научных исследований, гелиевая промышленность как таковая отсутствовала, а гелий при необходимости добывался лабораторными методами из любых его естественных источников, начиная от минералов и кончая возду-хом, содержащим всего 0,0005% (об.) гелия.

Скачок в объемах добычи гелия, начавшийся при развитии дири-жаблестроения, сменился к началу второй мировой войны депрес-сией, а примерно с 1950—1953 гг. масштабы добычи гелия в основных странах мира, располагающих гелиевым сырьем, т. е. в СССР и США, вновь неуклонно нарастают (см. гл. XII).

В связи с изменением конъюнктуры спроса в промышленности изменяются и требования к качеству и количеству сырья, поэтому оценочные параметры месторождений не могут иметь во времени единой количественной характеристики.

Ниже будут приведены оценочные параметры гелиевых место-рождений применительно к сырьевым возможностям трех гелие-добывающих стран мира — СССР, США и Канады — и современной потребности мировой промышленности в этом виде сырья.

**Масштаб месторождений.** По масштабу используемые промыш-ленностью месторождения гелия наиболее рационально подразделить на пять следующих категорий (табл. 62):

Таблица 62

Классификация промышленных месторождений гелия

Группа	По масштабу запасов		По качеству сырья	
	Запасы, млн. м <sup>3</sup>	Название	Содержание, об. %	Название
I	≥100	Уникальные	≥1,00	Весьма богатые
II	50—99	Крупные	0,50—0,99	Богатые
III	25—49	Средние	0,10—0,49	Рядовые
IV	5—24	Мелкие	0,05—0,09	Бедные
V	<5	Очень мелкие	<0,05	Весьма бедные

1. Уникальные, насчитывающиеся в мировой практике едини-цами, содержащие в составе своих газов от 100 млн. м<sup>3</sup> гелия и бо-лее. Одним из примеров этого типа месторождений является га-зо-нефтяное месторождение Хьюгтон-Пенхэндл (США, Мидкон-тинент).

II. Крупные месторождения с запасами 50—100 млн. м<sup>3</sup> гелия, на базе которых возможна организация ведущих в мировой добыче гелия предприятий.

III и IV. Средние и мелкие месторождения с запасами соответ-ственно 25—50 и 5—25 млн. м<sup>3</sup>. На их базе возможна организация лишь средних и мелких по производительности предприятий для добычи гелия.

V. Очень мелкие месторождения, не имеющие самостоятельного промышленного значения, запасы которых менее 5 млн. м<sup>3</sup>, недоста-точны для строительства отдельного предприятия для добычи гелия, но которые могут быть использованы для извлечения гелия совместно с другими месторождениями.

При современном состоянии изученности сырьевой базы мировой гелиевой промышленности трудно оценить количественное соотно-шение месторождений различных масштабов, но вне сомнения, что и для гелиевых месторождений справедливо правило, относящееся к другим видам промышленного сырья — на долю крупных и уникаль-ных по запасам месторождений приходится основная часть общих промышленных запасов гелия в мире, тогда как наибольшей частотой характеризуются мелкие и в меньшей мере средние по запасам место-рождения.

**Содержание гелия в природном газе.** Для оценки гелиевого сырья приемлема пятиступенчатая градация, применяемая для отдельных видов полезных ископаемых, характеризующихся большим разно-образием качества перерабатываемого сырья. В соответствии с этой градацией могут быть выделены (табл. 62) весьма богатые (весьма высококачественные), богатые (высококачественные), рядовые (сред-него качества), бедные (низкого качества) и весьма бедные (убогие) гелием природные газы. К весьма богатым гелием газам, т. е. к I категории сырья, следует относить газы, содержащие свыше 1% гелия; к богатым (II категория) — газы, содержащие от 0,50 до 1% гелия; к рядовым (III категория) — 0,10—0,50%, к бедным (IV категория) — 0,05—0,10% и к весьма бедным (V категория) — газы, содержащие меньше 0,05% гелия.

В зависимости от сырьевых возможностей отдельных стран кон-диционные концентрации гелия резко изменяются. Так, в США учету, охране и переработке подлежат лишь газы, содержащие от 0,3% гелия и более, тогда как в Западной Европе обсуждается вопрос об экономической целесообразности извлечения гелия из природных газов месторождения Слохтерен (Гронингем, Нидер-ланды), концентрация гелия в составе которых не превышает 0,06%.

Указанная выше градация концентраций гелия приемлема только для оценки месторождений углеводородных свободных газовых

скоплений. Для попутных газов, перерабатываемых на газобензиновых или химических заводах, где гелий может являться попутным продуктом, получаемым в результате комплексной переработки сырья, ценными на гелий могут оказаться и относительно бедные гелием природные газовые смеси. Так, попутный нефтяной газ, поступающий на газобензиновый завод с содержанием гелия около 0,08%, после извлечения тяжелых углеводородов может обогатиться гелием до 0,13—0,15%, т. е. если на входной нитке газопровода подается бедный гелием газ, то из выкида поступает уже несколько обогащенный им газ и к тому же охлажденный, но нуждающийся в дополнительном компримировании и очистке для получения из него гелия.

Таким образом, при комплексной переработке нефтяных газов попутная добыча гелия оказывается в ряде случаев экономически рентабельной, несмотря на обедненность гелием исходного сырья. Поэтому решение вопроса о целесообразности организации комплексной переработки попутных газов, добываемых при разработке нефтяных месторождений, с извлечением из них гелия следует производить только после соответствующего технико-экономического рассмотрения этого вопроса, а при оценке попутных газов как сырья для получения гелия требования к степени гелиенасыщенности должны быть снижены сравнительно с газами свободных метановых газовых скоплений.

Качество гелиеносных газов зависит от химического состава газа. Для азотных и углекислых газов, разведка и разработка которых ведется только с целью извлечения из них гелия, требования к качеству сырья резко повышаются, так как гелий является при этом основным, а не попутным продуктом производства, на который и пойдут все расходы, как по геологоразведочным, так и по эксплуатационным работам. Если намечается комплексная переработка этого вида газового сырья, например переработка газов на азотно-углеводородном заводе или получение твердой или жидкой углекислоты, то оценка качества газового сырья с точки зрения извлечения гелия будет зависеть от соотношения стоимостей основного и попутного добываемых продуктов. При их равенстве может применяться та же градация качества, что и для метановых газов.

**Технико-экономические условия.** Решающее значение при оценке целесообразности разработки месторождения для получения гелия имеют технико-экономические условия его эксплуатации. По характеру технико-экономических условий месторождения гелиеносных газов могут быть подразделены на три следующие группы:

1. Месторождения с благоприятными технико-экономическими условиями; расположены они в экономически освоенных районах с развитой сетью газопроводов и наличием или проектированием газоперерабатывающих предприятий, на базе которых могут действовать и установки для извлечения гелия; горно-технические условия эксплуатации месторождения благоприятны для организации высокопроизводительного предприятия для добычи гелия, обеспечивающего его получение с низкой себестоимостью.

2. Месторождения с обычными условиями эксплуатации; находятся в экономически слабо освоенных или малонаселенных районах, но сравнительно недалеко от освоенных районов. Подвозка оборудования и строительство предприятия для добычи гелия на месте или передача газа в освоенные районы с помощью газопровода не представляет особых затруднений.

3. Месторождения с неблагоприятными условиями; располагаются в труднодоступных, экономически неосвоенных районах со сложными технико-экономическими условиями их эксплуатации и прочими обстоятельствами, усложняющими и удорожающими промышленное освоение месторождения. В эту категорию могут попасть также и месторождения азотных газов, расположенные в экономически благоприятных условиях, но исключающих возможность организации комплексной переработки сырья, когда себестоимость добычи гелия превысит его цену.

Следует отметить, что при решении вопросов о промышленной ценности того или иного гелиевого месторождения и экономической целесообразности его освоения необходимо опираться на комплексное использование всех перечисленных нами выше оценочных параметров. Так, достаточно часто группа близко расположенных мелких по масштабам запасов месторождений с рядовой гелиенасыщенностью, находящихся в экономически освоенном районе, оказывается значительно более рентабельной для извлечения гелия, чем крупное по запасам месторождение высокогелиеносных азотных газов, расположенное в экономически неосвоенном районе без источников дешевого топлива или электроэнергии.

## § 2. ВЕДУЩИЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ ГЕЛИЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В соответствии с существующими представлениями под промышленным типом понимается совокупность однотипных месторождений, определившихся в отечественной и мировой практике как реальный поставщик данного вида сырья.

Различие в технологических схемах переработки газового сырья с целью извлечения из него гелия в зависимости от химического состава газа предопределяет собой и направление промышленной группировки гелиевых месторождений.

Технология переработки азотных и горючих газов существенно отличается тем, что при переработке азотных газов из производственной схемы выпадает выделение промежуточных горючих газовых смесей. Производственный цикл по переработке азотных газов в связи с этим значительно упрощается, хотя и резко удорожается, так как почти все расходы по производству падают на гелий.

Имеются некоторые различия и в переработке сухих (метановых) и жирных (нефтяных) углеводородных газов. Первые из них подаются потребителям по газопроводам, чаще всего без предварительной переработки, тогда как на базе вторых (при достаточных запасах

газа) строят обычно газоперерабатывающие заводы и дополнительная организация производства гелия на таких заводах оказывается рентабельной даже при невысоком его содержании.

При промышленной группировке гелиевых месторождений необходимо учитывать эти технико-экономические различия в схемах переработки газового сырья в зависимости от его основного состава. В связи с указанным среди промышленных типов гелиевых месторождений следует выделить по технологическому принципу метановые, нефтяные и азотные гелиеносные газы, или гелиевые месторождения, связанные с залежами углеводородных газов с подразделением их на две группы — сухих и нефтяных газов и гелиевые месторождения, связанные с азотными газами.

Относительное значение в удельном балансе современной сырьевой базы гелиевой промышленности различных типов гелиевых месторождений неодинаково, углеводородные газы имеют ведущее значение, азотные — второстепенное.

Большинство гелиевых заводов мира работает в настоящее время на смешанном газовом сырье углеводородного состава. Газ к заводам собирается как с нефтяных, так и с газовых залежей. Из 12 зарубежных гелиевых заводов 3 работают на азотных газах, остальные на углеводородных (см. гл. XI).

Неодинаковую промышленную ценность имеют и различные генетические типы гелиевых месторождений. По относительному значению в промышленном гелиевом балансе среди различных по генезису гелиевых месторождений можно выделить три промышленных типа: ведущий, второстепенный и сомнительный.

К ведущим промышленным типам гелиевых месторождений, составляющим основу современной сырьевой базы гелия, относятся кларковая и продуктивная группы смешанного генетического подтипа месторождений. На долю этих месторождений приходится примерно 80% всех учтенных запасов.

К второстепенным промышленным типам гелиевых месторождений могут быть отнесены окислительная группа остаточного подтипа и миграционный тип месторождений гелиеносных газов, на долю этих месторождений приходится не более 15—20% всех учтенных запасов гелия.

Сомнительные в промышленном отношении гелиевые месторождения не играют практической роли в общем балансе запасов гелия в связи с незначительной распространенностью, низким содержанием гелия или его малыми запасами. К этим месторождениям могут быть отнесены солотационная и термическая группы остаточного подтипа, а также дегазационные залежи гелиеносных газов.

Необходимо отметить, что изученность вопросов генезиса гелиевых месторождений еще далека от своего завершения, поэтому приведенную промышленную группировку гелиевых месторождений следует рассматривать как рабочую схему, пригодную для использования при ориентации поисковых работ на гелий с учетом современной изученности вопросов геологии гелия.

## МЕТОДЫ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЕЛИЕНОСНЫХ ГАЗОВ

Промышленные концентрации гелия в природных газах возникают при самых разнообразных условиях, что затрудняет его поиски. Месторождения гелиеносных газов могут быть обнаружены не только в палеозойских, но также, хотя и реже, в мезозойских и крайне редко в кайнозойских отложениях как вблизи от поверхности, так и на значительной глубине, в разнообразных тектонических регионах, причем не только в районах повышенной радиоактивности, но и в районах кларковой и даже пониженной радиоактивности.

Многие районы, перспективные на нефть и газ, являются одновременно перспективными и с точки зрения обнаружения в них промышленных месторождений гелия, хотя и с различной степенью вероятности.

Несмотря на широкий диапазон геологических условий, в которых возможно формирование месторождений гелиеносных газов, безусловно, представляется реальным наметить как районы наибольшей вероятности их обнаружения, так и наиболее результативные методы ведения поисковых работ.

### § 1. ПОИСКОВЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ И ПРИЗНАКИ

В соответствии с общепринятыми определениями, используемыми для других видов полезных ископаемых, под поисковыми геологическими критериями на гелий мы будем понимать комплекс геологических факторов, прямо или косвенно указывающих на возможность обнаружения месторождений гелиеносных газов в каком-либо регионе, а под поисковыми геологическими признаками — конкретные факты, указывающие на наличие повышенной гелиевой концентрации в районе исследования.

Среди основных геологических поисковых критериев на гелий выделяются следующие: фациально-литологический, стратиграфический, структурный, геохимический, метаморфогенный и гидрогеологический. Основными признаками месторождений гелиеносных газов следует считать обнаружение повышенной и высокой гелиеносности в выявленных в районе как промышленных, так и непромышленных газопроявлениях, а также повышенной и высокой упругости гелия в подземных флюидах. Непременным требованием к району

намечаемых поисков промышленных месторождений гелия должна являться его перспективность на нефть или газ.

**Литолого-фациальные критерии.** Литолого-фациальный состав вмещающих коллекторов может быть использован в качестве поискового критерия, поскольку толщи осадочных отложений с повышенной рассеянной радиоактивностью характеризуются при прочих равных условиях большей степенью вероятности обнаружения промышленных концентраций гелия в составе газов, чем толщи с пониженной радиоактивностью. Наиболее благоприятными по фациальным условиям являются районы распространения отложений морских глин, черных битуминозных сланцев, фосфатных пород и других типов осадочных отложений, часто характеризующихся повышенными концентрациями радиоактивных элементов. Менее благоприятны с точки зрения сингенетического образования гелия разрезы, включающие в себя мощные толщи галогенов и карбонатов. Однако решающего значения в вопросах перспектив гелиеносности данные о фациальном составе осадочных отложений не имеют в связи с высокой миграционной способностью гелия. Промышленные месторождения гелиеносных газов могут быть обнаружены как в районах распространения карбонатных и соленосных формаций, так и глинистых и фосфатных, хотя последние в целом несколько более благоприятны для поисков гелия, чем первые.

**Стратиграфические критерии.** Абсолютный возраст пород, в которых ведутся поиски гелия, является одним из важнейших поисковых критериев. Закономерная приуроченность промышленных месторождений гелия, а также гелиевых проявлений к наиболее древним по возрасту отложениям выдерживается в пределах всей Земли и является достаточно четким коррелятивом благоприятных условий для накопления гелия.

Стратиграфическая приуроченность гелиевых месторождений к отложениям палеозоя вполне естественна для гелия, являющегося продуктом радиоактивного распада, накопление которого идет в строгом соответствии с временем и исходным количеством образующих его радиоактивных элементов.

Древний возраст отложений благоприятен также и для эффективного воздействия глубинного гелиевого потока, мигрирующего в осадочную толщу из недр, на ее общий гелиевый баланс. Редкие случаи обнаружения промышленных месторождений гелиеносных газов в отложениях мезо-кайнозоя объясняются чаще всего процессами вторичного обогащения гелием залежей природных газов, а также миграцией глубинных флюидов с высоким содержанием гелия в верхние стратиграфические комплексы отложений.

Работы по поискам гелия в соответствии с этим должны проводиться главным образом в районах палеозойской нефтегазности, но не следует исключать из внимания также и отложения мезо-кайнозоя на участках, благоприятных для миграции глубинных флюидов (области, прилегающие к разломам, сбросам и прочим глубоким тектоническим нарушениям), а также нефтегазносные зоны, благо-

приятные с точки зрения течения процессов вторичного обогащения газов гелием (окисление или растворение углеводородов и т. п.).

**Структурные критерии.** Основные запасы гелиеносных природных газов обнаружены в районах древних платформ, в меньшей мере на участках предгорных прогибов (поднятий) и внутригорных котловин и почти полностью отсутствуют на территориях молодых платформ и геосинклинальных областей. Эта закономерная приуроченность залежей гелиеносных газов к определенным тектоническим регионам хорошо согласуется с общими геологическими условиями процессов накопления гелия. На территориях древних платформ, а также в межгорных впадинах палеозойского заложения формирования залежей гелиеносных газов могут одновременно способствовать несколько факторов — длительность процессов сингенетического накопления гелия, воздействие глубинного гелиевого потока и др. В залежах природных газов этих районов возможно однонаправленное действие всего комплекса процессов как первичного, так и вторичного обогащения гелием. Здесь возможно обнаружение почти всех генетических типов и групп месторождений гелиеносных газов.

В районах предгорных прогибов и поднятий, а также межгорных впадин мезо-кайнозоя формирование залежей гелиеносных газов происходит главным образом за счет процессов вторичного обогащения их гелием. Основное распространение здесь получают залежи остаточного типа — окислительные и солютационные. Вероятность обнаружения промышленных месторождений гелиеносных газов в районах молодых платформ невелика в связи с тем, что возраст нерекрывающих их отложений мезо-кайнозоя недостаточен для продуктивного сингенетического гелиенакопления.

Влияние гелиевого потока, мигрирующего из коровых глубин, в этих регионах может быть в значительной мере снижено толщиной метаморфических осадков палеозоя, а возможно, и исключено совсем. Объемы гелия, мигрирующего из метаморфизованных пород палеозойского фундамента в осадочную толщу, невелики (малы сроки сингенетического образования гелия сравнительно с породами докембрийского фундамента, много утрачено его за счет процессов метаморфизации пород и т. п.) и существенного влияния на гелиевый баланс осадочной толщи мезо-кайнозоя не оказывают. Лишь на участках активного вторичного обогащения, а также в зонах, прилегающих к глубинным разломам, возможно обнаружение залежей гелиеносных газов обычно либо невысокого качества, либо с незначительными запасами сырья.

Еще меньше вероятность обнаружения промышленных месторождений гелия в геосинклинальных районах, в которых действуют все те же отрицательные с точки зрения возможности накопления гелия факторы, которые отмечены нами для районов молодых платформ, только в более резкой форме. К тому же в названных районах снижается и роль дизъюнктивных нарушений как каналов передачи

глубинных флюидов, обогащенных гелием, в связи со значительной мощностью осадконакопления. Здесь не могут быть продуктивными и процессы вторичного их обогащения. В связи с комплексным действием всех этих факторов ни одного промышленного месторождения гелиеносных газов в геосинклинальных районах до сих пор не обнаружено.

Структурные критерии неразрывно связаны со стратиграфическими и литолого-фациальными критериями, все они в комплексе отражают единый процесс тектогенеза и осадконакопления, определяющий продуктивность процессов накопления гелия на том или ином участке недр, исследуемом на гелиеносность, и должны учитываться совместно.

**Геохимические критерии.** Исследование химического состава всех выявленных газопроявлений в регионе является единственным методом обнаружения среди них месторождений с промышленной концентрацией гелия. Кроме массового исследования состава залежей природных газов могут быть использованы также и различные другие поисковые геохимические критерии для ориентации поисковых работ на участках с наиболее высокими перспективами обнаружения зон промышленного накопления гелия.

Основными из них являются данные об общей радиоактивности отложений, вмещающих и подстилающих продуктивную на нефть и газ толщу коллекторов, а также сведения о региональных изменениях общего химического состава природных газов в районе исследований и данные по упругости гелия в подземных водах, заполняющих продуктивные отложения.

Исследование содержания радиоактивных элементов в земной коре в значительной мере помогает предсказывать, каков может быть гелиевый потенциал той или иной площади при поисках месторождений гелиеносных газов.

Генетическая взаимосвязь радиоактивной, главным образом урановой, минерализации пород с интенсивностью процессов генерации гелия столь очевидна, что ориентация поисковых работ в районы, где имеются отложения, обогащенные нефтью, газом и ураном, не нуждается в дополнительных доказательствах. Следует лишь отметить, что положительным критерием с точки зрения обнаружения гелиевых месторождений является общая повышенная рассеянная радиоактивность как вмещающих пород, так и всей нижней части разреза отложений, включая и фундамент. Зоны совмещения в пространстве геохимических урановых провинций с промышленной нефтегазонасностью палеозоя являются наиболее благоприятными районами для обнаружения промышленных месторождений гелиеносных газов.

Существенную помощь при выборе направления работ по поискам гелия может оказать изучение закономерностей изменения состава природных газов в пределах нефтегазоносных провинций. Общее увеличение содержания азота в составе природных газов является благоприятным признаком, так как может указывать на интенсифика-

цию процессов вторичного обогащения залежей природных газов гелием за счет биохимического окисления углеводов и их растворения в омывающих залежи водах зоны повышенного водообмена. Хорошим подтверждением надежности азотного критерия является тот факт, что для наиболее высококачественных промышленных месторождений гелия характерен азотный состав и, кроме того, подавляющая часть промышленных месторождений гелиеносных газов связана, как правило, с углеводородными газами, содержащими свыше 15% азота. Промышленная гелиевая концентрация в составе газов, содержащих меньше 5% азота, встречается редко.

**Метаморфогенные критерии.** Метаморфизм пород приводит к массовому высвобождению гелия из кристаллических решеток генерирующих его минералов. При этом особенно интенсивным оказывается действие процессов термометаморфизма в сочетании с динамометаморфизмом. Длительное воздействие высоких температур на породы способствует высвобождению гелия из решеток образующих его минералов, а повышение их трещиноватости обеспечивает возможность относительно свободной утечки гелия из них. В результате совместного действия этих процессов в осадочную толщу, перекрывающую породы, подвергнувшиеся метаморфизму, поступает дополнительное количество гелия, возникает положительная гелиевая аномалия, длительность существования которой ограничивается промежутком времени, необходимым для выравнивания ее избыточного потенциала.

**Гидрогеологические критерии.** Гидрогеологическая обстановка существования нефтегазовых скоплений в значительной мере определяет сохранность накапливающегося в них гелия. Поэтому оценке гидрогеологических условий района поисков необходимо уделять должное внимание.

Для формирования гелиевых месторождений фонового типа наиболее благоприятна зона застойного и затрудненного водообмена, поэтому поиски месторождений такого типа могут вестись только в областях закрытого гидродинамического режима. Однако для вторичного обогащения залежей гелием более благоприятен режим повышенного водообмена, поэтому все краевые зоны нефтегазоносных провинций, а также их внутренние участки, характеризующиеся повышенным водообменом и соответственно неблагоприятной обстановкой сохранения нефтегазовых скоплений, являются весьма перспективными с точки зрения возможности обнаружения гелиевых месторождений остаточного типа. Эта двойственная оценка значения гидрогеологических факторов не должна упускаться из вида при ведении работ по поискам гелия.

Благоприятным гидрогеологическим критерием следует считать повышенную и высокую упругость гелия в составе газов, растворенных в подземных водах, но одновременно с этим низкая упругость гелия в них не является отрицательным показателем.

## Относительное значение поисковых критериев для гелиевых месторождений

Для поисков различных генетических типов и групп гелиевых месторождений необходимо использовать различные оценочные критерии. Так, стратиграфические критерии имеют решающее значение при поисках гелиевых месторождений кларковой группы фонового типа, тогда как геохимические совместно со стратиграфическими — для поисков месторождений радиогенной группы.

Таким образом, оценочное значение поисковых геологических критериев неодинаково для месторождений гелия разных генетических типов. Неодинакова их роль также и при ведении поисковых работ с различной степенью детальности. При оценке крупных регионов как возможных гелиевых провинций главную роль играют стратиграфический, структурный и геохимический (радиометрический) критерии, тогда как для обнаружения новых перспективных районов внутри выявленной геохимической провинции значительное внимание следует уделить также и гидрогеологическому критерию.

В целом наиболее благоприятными поисковыми критериями на гелий следует считать древний возраст продуктивных на нефть и газ отложений и высокие концентрации радиоактивных элементов для района в целом. Благоприятна также смена в недавние эпохи времени гидрогеологического режима с закрытого в течение геологически длительного периода времени на режим с повышенной (но не высокой!) активностью водообмена. Положительным критерием является также близость пород докембрийского кристаллического фундамента, кислых по составу, или их выступов в продуктивной части отложений. Процессы метаморфизма, охватившие в недавнем прошлом породы, подстилающие продуктивные отложения, являются благоприятным критерием.

## § 2. ВИДЫ И ЭТАПЫ ПОИСКОВЫХ РАБОТ НА ГЕЛИЙ

Обычно под поисками понимают комплекс геологических исследований, направленных на обнаружение промышленных месторождений полезных ископаемых.

Поскольку в промышленных масштабах гелий в настоящее время добывают только из природных газов как свободных, так и попутных, чаще углеводородного, реже азотного состава, то, следовательно, работы по поискам гелия должны быть направлены главным образом на поиски природных газов с достаточно высокой концентрацией гелия в их составе, обеспечивающих его рентабельное промышленное извлечение. Эти поисковые работы можно подразделить на попутные и специальные.

Поскольку основным источником получения гелия являются углеводородные газы с кондиционной гелиеностью, поиски гелия являются главным образом попутными.

Специальные поиски гелия ведутся значительно реже, главным образом в районах распространения высокогелиеносных азотных газов. По этапам специальные поисковые работы можно подразделить на три части: региональные, рекогносцировочные и детальные.

Первый этап — региональный, или предварительный, его задачей является выявление зон регионального накопления гелия. Работы выполняются на основе геологических карт 1 : 500 000 — 1 : 2 500 000 с использованием данных об условиях, способствующих образованию, накоплению и сохранению гелиеносных газов в недрах. Степень обоснованности запасов гелия, подсчитываемых при данной стадии поисков, соответствует категориям  $D_1$  и  $D_2$ .

Второй этап поисков — рекогносцировочный. Главная задача этого этапа работ — выявление зон промышленной гелиеносности природных газов. Работы выполняются на основе систематизации анализа и обобщения данных о газеносности и гелиеносности изучаемого региона. Используются геологические карты масштаба 1 : 200 000 — 1 : 500 000, реже и более крупного масштаба, а также данные по скважинам и различным естественным водо- и газопроявлениям. В результате работ по второму этапу поисков составляются карты гелиеносности природных газов района, на них выделяются зоны промышленной гелиеносности. Работы по данному этапу поисковых работ должны дать материал, обеспечивающий степень изученности запасов по категории  $C_2$ .

Третий этап поисков — детальный. Его цель — выделение перспективных участков для проведения детальной разведки. Производится изучение предварительно намеченных участков путем геохимических исследований природных газов при попутных поисках и пробной эксплуатации и геохимических исследований при специальных поисках. Состояние изученности запасов гелия при детальной стадии поисков должно соответствовать категории  $C_1$ .

При ведении попутных поисковых работ четкого подразделения между рекогносцировочным и детальным этапами поисков нет. Они объединяются в единый этап детального опробования всех промышленных нефтегазопроявлений с целью выявления среди них месторождений, пригодных для рентабельного извлечения гелия.

## § 3. МЕТОДЫ ПОИСКОВ ГЕЛИЯ

Обычно после выбора нефтегазоносных регионов, геологические условия которых благоприятны с точки зрения возможности обнаружения на их территории месторождений с повышенными концентрациями гелия, приступают непосредственно к повсеместному опробованию всех промышленных нефтегазопроявлений на содержание в них гелия и после выявления промышленных концентраций гелия на отдельных месторождениях проводят разведку его запасов. Попутный метод ведения поисков месторождений гелиеносных газов совершенно не сопоставим по экономичности и надежности ни с какими



ными методами поисков, поэтому получил наиболее широкое распространение. Именно этим путем и были обнаружены почти все месторождения гелиеносных газов мира.

Однако в настоящее время прирост запасов гелия, обеспечиваемый их попутными поисками, не удовлетворяет современным требованиям промышленности. В этих случаях проводятся специальные работы для поисков гелия, выбираются районы и намечаются участки для постановки исследований и поисково-разведочного бурения. Нередко также участки не совпадают с районами наибольшей нефтегазоносности. Площадь перспективной гелиеносности обычно шире площади перспективной нефтегазоносности за счет включения в нее периферийных частей нефтегазоносных бассейнов и его верхних осадочных этажей с неблагоприятными условиями сохранения углеводородов, но с благоприятными условиями существования остаточных запасов окисленных и разрушенных газовых залежей, обогащенных гелием. Специальные поиски гелиеносных газов ведутся также и в районах распространения газовых залежей неуглеводородного состава с повышенным содержанием гелия.

В основе рационального метода ведения этих специальных поисковых работ лежат поиски промышленных газовых скоплений в виде свободных газовых залежей или газов, растворенных в нефти в условиях, благоприятных для продуктивного накопления гелия. Поиски промышленных газовых скоплений ведутся обычными методами нефтепоисковой геологии, их рассмотрение не является нашей задачей. Оценка перспектив гелиеносности природных газов выполняется с помощью методов геологического и геохимического анализов.

К геологическим методам оценки относятся геолого-геоструктурный и палеогидрогеологический анализы, к геохимическим — радиометрический и геохимический анализы.

В зависимости от этапа поисковых работ, специфики геологических условий в районе поисков, а также от генетических типов гелиевых месторождений, обнаружение которых возможно в намеченном регионе, выбор рациональных методов поисков гелиевых месторождений широко меняется. Например, при поисках месторождений кларковой группы основное внимание уделяется геологическим исследованиям, при поисках месторождений продуктивной группы весьма существенной становится также роль и геохимического метода, тогда как при обнаружении месторождений с промышленной гелиеносностью остаточного генетического типа нередко основная роль принадлежит палеогидрогеологическому анализу.

Эффективность методов специальных поисков гелия во многом определяется правильностью представлений о генетических типах месторождений гелия в районе исследований. Применяемые методы поисков носят нередко комплексный характер.

Анализ геологических факторов, контролирующих локализацию гелиевых месторождений, основан на использовании всех благоприятных поисковых геологических критериев, таких, как структурный, стратиграфический, палеогидрогеологический и др.

Общая оценка глубины залегания, возраста и состава пород фундамента позволяет дать ориентировочную оценку доли участия глубинного гелия в его общем балансе в осадочной толще. Особое внимание при поисках гелиеносных газов обращается на зоны региональных разломов и прочих глубоких тектонических нарушений, которые могут способствовать миграции глубинных флюидов, обогащенных гелием, в вышележащие продуктивные отложения. Она гидрогеологической разгрузки при этом являются участками, благоприятными для поисков гелиевых месторождений. Необходимо также учитывать и структурное положение района исследований. Участки, прилегающие к моноклинальным склонам древнего фундамента, к различным его выступам, более благоприятны, чем участки, прилегающие к глубоким краевым прогибам кайнозойского заложения.

При использовании геохимических методов поисков обращается внимание на имеющиеся данные о радиоактивности пород, а также на закономерности изменения состава газов в регионе как свободных так и растворенных в подземных водах и нефтях.

Генетическая взаимосвязь гелия и радиоактивных элементов предопределяет собой теоретическую возможность использования данных о радиоактивности пород и флюидов при поисках гелия. Однако в постановке специальных радиометрических исследований с целью поисков гелия все же нет необходимости, так как разнообразие факторов, способствующих продуктивному накоплению гелия в залежах природных газов, не позволяет дать однозначную интерпретацию получаемых данных, тогда как стоимость производства этих работ высокая.

Наличие гамма-аномалий или радиоактивных эманаций в объектах исследования, характеризующих повышенную радиоактивность пород, совершенно недостаточно для утверждения о наличии повышенной гелиеносности содержащихся в разрезе флюидов, так как в случае гидрогеологической раскрытости разреза существенных накоплений гелия не произойдет. Поэтому такие методы, как эманационный, а также гамма-съемка и гамма-картаж, имеющие большое практическое значение при поисках радиоактивных руд, при поисках гелия могут иметь только вспомогательное значение.

При поисках гелия обычно вполне достаточно довольствоваться теми материалами, которые получают при проведении попутных или специальных поисков радиоактивного сырья, а также данными радиокаротажа глубоких скважин. И лишь при полном отсутствии материала по радиоактивности пород или его существенной недостаточности может быть выполнен небольшой объем радиометрических исследований с целью ориентировочной оценки радиоактивности пород как продуктивной, так и нижележащей частей разреза, по возможности вместе с породами фундамента.

Данные о повышенной радиоактивности отложений могут быть положены в основу положительной оценки перспектив гелиеносности природных газов района.

Вопрос о необходимости проведения работ по гелиевой съемке с целью поисков гелия может быть оценен примерно так же, как и радиометрическая съемка, т. е. технико-экономическая эффективность этого вида исследований недостаточна для того, чтобы рекомендовать постановку этих работ при ведении поисков гелия.

Гелиевые аномалии, выявленные в процессе газосъемочных работ, не имеют однозначной интерпретации. В большинстве своем они свидетельствуют о наличии различных тектонических нарушений в районе поисков, интенсивность продвижения восходящего гелиевого потока по которым выше, чем по соседним ненарушенным отложениям.

К тому же совершенно лишены теоретического смысла попытки поисков залежей гелиеносных газов, находящихся в равновесии по упругости с окружающими их водами, а ведь их в природе большинство, что отмечалось нами выше \*. Гелиевая аномалия, имеющая поисковое значение, может возникнуть в приповерхностных отложениях только над относительно неглубоко залегающей крупной по запасам газовой залежью со значительной избыточной упругостью содержащегося в ней гелия относительно вмещающих залежь вод и пород. Только при поисках подобного типа месторождений постановка работ по гелиевой съемке может быть теоретически оправдана.

Гелиевый каротаж скважин, проводимый одновременно с газовым каротажем, позволит получить ценный фактический материал о гелиеносности подземных флюидов изучаемого района, поэтому он может быть рекомендован при ведении поисковых работ на гелий.

Весьма эффективны при проведении поисков гелия различные газохимические исследования как свободных, так и растворенных газов, сопровождающиеся построением карт изменения упругостей гелия и азота в составе газов, а также различными газогидрохимическими картами.

При проведении буровых работ необходимо исследовать на содержание и упругость гелия все газонефтеводопроявления, полученные при испытании скважины.

Необходимо также кратко остановиться на рассмотрении специфики ведения поисков гелия в различных геолого-структурных регионах.

Залежи гелиеносных газов могут быть обнаружены в различных геоструктурных регионах, но их генетический тип, а следовательно, и методы поисков будут разными.

В осадочных отложениях древних платформ широкое распространение могут иметь различного типа гелиевые месторождения, а по окраинам нефтегазоносных бассейнов — главным образом остаточ-

ные. При их поисках в первую очередь необходимо обращать внимание на возраст продуктивных отложений и возможности образования гелия породами фундамента и осадочной толщи.

Нередко при этом достаточно знать фациальный состав и общую характеристику радиоактивности пород района. Большое значение имеет для таких районов оценка их палеогидрогеологических условий. Длительная гидродинамическая закрытость отложений благоприятна для формирования месторождений гелиеносных газов, а их незначительное раскрытие в последние или какие-либо краткие промежуточные этапы времени благоприятно для дополнительного обогащения гелием залежей за счет действия различных вторичных процессов.

Длительность процессов накопления гелия в мезозойских осадочных отложениях молодых платформ недостаточна для формирования большей части промышленно-генетических групп месторождений гелиеносных газов. Здесь трудно рассчитывать на обнаружение кларковой или продуктивной групп фоновых типа гелиевых месторождений, т. е. ведущих в промышленном отношении групп, но не исключена возможность обнаружения залежей гелиеносных газов дегазационного или остаточного типа. Поэтому при поисках гелия в таких регионах в первую очередь необходимо обращать внимание на районы тектонической активности в прошлом или настоящем. Гелиевые месторождения будут в таких районах тяготеть главным образом к районам развития региональных разломов, различных дизъюнктивных нарушений и зонам метаморфизации, обеспечивающим миграцию глубинных флюидов в вышележащие отложения, благоприятны также участки выступов пород палеозойского фундамента в глубь перекрывающей его осадочной толщи мезокайнозоя. Примерно такое же направление поисковых работ, как и на молодых платформах, должно соблюдаться на участках предгорных прогибов и межгорных котловин.

Исключение составляют лишь межгорные впадины и прогибы палеозойского заложения, где условия обнаружения залежей гелиеносных газов идентичны районам древних платформ.

Производство специальных поисковых работ на гелий в геосинклинальных районах не рекомендуется в связи с их крайне низкой эффективностью. Оправданными в таких районах могут являться лишь попутные поиски гелия.

\* Нельзя согласиться с изложенным здесь мнением автора книги о ненужности и теоретической необоснованности гелиевой съемки, являющейся единственным прямым методом поисков гелиеносных газов. По аналогии с газовой съемкой для поисков нефти и углеводородного газа следует рекомендовать применение глубинной гелиевой съемки с определением гелия в газах с глубин 20—50—100 м. (Прим. ред.).

## РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ГЕЛИЕНОСНЫХ ГАЗОВ

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к разведке газового сырья, определение в его составе содержания гелия является обязательным, поэтому при правильно поставленных газоразведочных работах в проведении специальных разведок на гелий нет необходимости. Доразведка месторождений на гелий необходима только в тех случаях, если не были соблюдены правила отбора проб газа для определения гелия, если содержание гелия в процессе эксплуатации залежи изменяется, а также в том случае, если на месторождении предполагается строительство гелиевого завода.

Специальная разведка месторождений на гелий производится только на месторождениях азотных газов, во всех иных случаях она входит в обязательный комплекс геологоразведочных работ на горючий газ. Высокие диффузионные свойства гелия, его низкая растворимость в нефтях и в водах в поверхностных условиях и крайне незначительное содержание гелия в воздухе обуславливают необходимость соблюдения ряда специфических требований к опробовательским работам на гелий.

Газовые пробы, предназначенные для анализа на гелий, не должны отбираться в емкости, характеризующиеся повышенной проницаемостью, в частности, в сосуды из кварцевого стекла, а также в баллоны из резины. Обычное бутылочное стекло или металлические контейнеры пригодны для отбора газовых проб на гелий, но запирающие устройства должны исключать возможность его утечки. В частности, водные затворы перед пробками в бутылках должны быть обязательными, так как низкая растворимость гелия в воде затормозит его потери сквозь пробку. Сроки хранения проб газа, отобранных в бутылки и предназначенных для определения в них гелия, должны быть по возможности минимальными, так как утечка гелия вследствие процессов фазовых взаимодействий между средами природный газ — водный затвор — пробка — воздух неизбежна и тем интенсивнее, чем выше концентрация гелия в газе.

Методы отбора проб газа для определения гелия не имеют каких-либо специфических особенностей сравнительно с пробами, предназначенными на общий анализ. Однако при отборе проб воднорастворенного или попутного газа необходимо учитывать, что в связи с низкой растворимостью гелия в жидкостях при дегазировании он будет выделяться вместе с другими наименее растворимыми газами

(азотом, аргонном) в первую очередь. Поэтому следует проводить полную дегазацию пробы с тем, чтобы избежать получения завышенных по гелию результатов. При глубинном опробовании нефти или пластовой воды необходимо обеспечение полного соответствия условий существования пробы в пробоотборнике пластовым условиям.

Любые потери части газа из пробоотборника как при его извлечении из скважины вследствие неплотной герметизации, так и при переводе пробы из пробоотборника в контейнер приводят к снижению его гелиеисности сравнительно с пластовыми условиями.

### § 1. ВИДЫ ЗАПАСОВ ГЕЛИЯ И ИХ КАТЕГОРИИ

Запасы гелия разделяются на те же группы и категории запасов, на которые разделяются запасы газов, содержащих гелий. По качеству сырья и горнотехническим условиям эксплуатации различают балансовые и забалансовые запасы гелия. По степени изученности запасы гелия подразделяются на четыре категории: А, В, С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub> в соответствии с инструкцией по классификации запасов месторождений (залежей) нефти и горючих газов. Для оценки потенциальных возможностей развития гелиевой промышленности определяются прогнозные запасы гелия.

Степень изученности месторождения, обуславливающая категорию запасов гелия, должна соответствовать степени изученности, а следовательно, и категории запасов газа, содержащего гелий. В зависимости от категории запасов сведения о гелиеисности газов должны быть охарактеризованы со следующей степенью детальности.

*Категория А.* Гелиеисность газовой (нефтяной) залежи должна быть установлена на основании достаточного количества хорошо увязывающихся между собой анализов свободного (попутного) газа с определением процентного содержания гелия. Пробы на анализ следует отбирать из скважин, расположенных на различных гипсометрических отметках и участках залежи. Число анализов газа с определением гелия не должно быть меньше двух из каждой опробованной скважины. В случае нефтяной залежи наряду с пробами попутного газа, отобранными из трапа однократной сепарации, должны быть изучены на гелиеисность глубинные пробы нефти, разгазированные контактным способом. При наличии участков залежи с повышенным (пониженным) содержанием гелия в газе необходимо изучить характер изменения химического состава газа по площади месторождения.

*Категория В.* Гелиеисность газовой (нефтяной) залежи установлена на основании достоверных анализов проб свободного (попутного) газа с определением процентного содержания гелия, отобранных не менее чем из двух скважин по 2 пробы из каждой, расположенных на различных участках структуры. В случае нефтяной залежи — это должен быть газ контактного дегазирования глубинной пробы.

**Категория С<sub>1</sub>.** К этой категории относятся запасы гелия, для которых степень гелиеносности установлена по данным достоверного \* анализа пробы газа, отобранной из одной скважины, или принята по аналогии с запасами, разведанными по более высоким категориям на площадях, непосредственно примыкающих к залежи.

**Категория С<sub>2</sub>.** Гелиеносность газовой (нефтяной) залежи принимается по аналогии с другими месторождениями данной нефтеносной провинции.

Если месторождение передается для промышленного извлечения гелия (вне зависимости от принятой для него категории учета запасов) рекомендуется произвести дополнительное опробование на гелий всех эксплуатационных скважин. Разрыв во времени между последним контрольным опробованием гелиеносности газов на эксплуатируемом месторождении попутных газов и началом строительства завода не должен быть более шести месяцев.

Прогнозные запасы гелия оцениваются на основе прогнозных запасов горючих и азотных газов. Степень прогнозной гелиеносности определяется для отдельных тектонических регионов на основе имеющегося фактического материала и общих сведений о закономерностях формирования залежей гелиеносных газов в различных геолого-тектонических регионах.

## § 2. ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ ГЕЛИЯ

В основе правильного подсчета запасов гелия лежат два основных фактора — достоверное определение общих запасов газа и его гелиеносности. Обсуждение точности определения общих запасов газа не является нашей задачей, поэтому остановимся на оценке основных затруднений, связанных с определением средней гелиеносности газов, а также на специфике подсчетов запасов гелия в составе газов в зависимости от особенностей режима их существования в пластовых условиях.

Правильная оценка величины средней гелиеносности газа — главное условие достоверности выполненного подсчета запасов гелия.

Расчет средней гелиеносности газов производится только по данным достоверных определений.

Отбраковка результатов анализов, содержащих грубые ошибки в определении гелия, вызванные различными погрешностями опробовательских и лабораторных работ, производится по каждой из опробованных скважин отдельно по годам опробования.

При этом следует учитывать, на каком приборе производилось определение гелия. Наиболее точные результаты получаются при анализе газа на ртутном приборе (В. Г. Хлопина — Э. К. Герлинга, В. А. Соколова и др.). Поэтому предпочтение надо отдавать определениям гелия на ртутных приборах, а противоречащие им значе-

\* Под достоверным анализом понимается в данном случае анализ, подтвержденный контрольным определением, либо не противоречащий общегеологическим условиям обнаружения залежи.

ния, полученные на хроматографических и масс-спектрометрических приборах, надо отбраковывать.

Отбраковке подлежат также пробы, содержащие более 5% кислорода, так как пересчеты гелия на безвоздушную часть при значительных примесях воздуха приводят к значительным отклонениям.

При подсчете средней гелиеносности должны быть исключены результаты анализов газа, пробы которых отобраны при условиях, не обеспечивающих сохранение общего состава газа. Особенное внимание следует обращать при этом на пробы газа, растворенного в нефти.

Для подсчета запасов гелия в попутных газах следует использовать данные анализа газа, полученного при однократном разгазировании глубинных проб нефти. Глубинное опробование нельзя применять тогда, когда пластовое давление падает ниже давления насыщения нефти и в пласте появляется свободный газ. Поэтому в случае разведки насыщенной нефтяной залежи (давление насыщения равно пластовому) необходимо подвергнуть ее глубинному опробованию до начала эксплуатации или в самый начальный момент эксплуатации, пока в пласте не началось разгазирование нефти.

Пробы газа, отобранные на поверхности из трапа, менее достоверно отражают состав попутного газа и степень его гелиеносности. Их можно использовать для подсчета среднего процентного содержания гелия в попутном газе только в том случае, если одновременно с отбором пробы газа из трапа однократного разгазирования отбираются пробы трапной нефти в контейнер с целью определения количества и состава газа, уносимого нефтью из трапа. Если не принимать во внимание количество и состав газа, увлекаемого нефтью из трапа, то будет занижена газонасыщенность нефти, а гелиеносность попутного газа завышена.

Несмотря на то, что пробы попутного газа, отобранные на поверхности, менее пригодны для подсчета запасов гелия, изучать состав трапного газа необходимо, так как он наиболее близко отражает гелиеносность того газа, который будет поступать на гелиедобывающие установки.

Степень средней гелиеносности определяется следующим образом: по данным достоверных анализов, оставшихся после отбраковки, для каждой скважины в отдельности подсчитывается средняя гелиеносность газов. Если залежь не разрабатывалась, то при подсчете средней гелиеносности газов по скважине принимают во внимание все данные достоверных определений гелия. Если залежь разрабатывалась и при этом отмечается изменение состава газа и соответственно его гелиеносности со временем, то определение величины средней гелиеносности газов по скважине производится по данным только последнего года опробований — в случаях, когда ведется подсчет текущих запасов гелия или первого года, если выполняются различного рода геохимические исследования.

Если в результате сопоставления выяснится, что гелиеносность газа изменяется по площади залежи незначительно, то среднепроцентное

содержание гелия в залежи вычисляется как среднеарифметическое по всем скважинам.

Иногда в силу различных причин (наличие оторочки, блочное строение, воздействие контурных вод и др.) наблюдаются закономерные изменения по площади залежи химического состава газа и содержания гелия в нем. Непостоянство химического состава газа по площади залежи может привести к непостоянству состава добываемого газа в ходе эксплуатации, поэтому в практике ведения разведочных работ на гелий возможность таких случаев всегда следует иметь в виду.

Расчет среднего процентного содержания гелия в газе при непостоянном его составе несколько сложнее, так как требуется гораздо больше фактического материала. Среднее процентное содержание гелия при отсутствии постоянства химического состава газа в залежи подсчитывается как средняя арифметически взвешенная по площади величина.

По месторождениям, из которых добывают гелий, а также проектируемым к эксплуатации, необходимо вести систематический ежегодный контроль за изменением степени средней гелиеносности газов.

Состав добываемого газа (свободного или попутного) нередко в ходе эксплуатации изменяется в связи с самыми разнообразными причинами, обусловленными разгазированием контурной и подошвенной воды или нефтяной оторочки при снижении давления в газовых залежах, поступлением газа из других пластов и залежей, непостоянством химического состава по площади до начала эксплуатации, разгазированием пластовой нефти при режиме растворенного газа и т. д. При изменении химического состава газа меняется и процентное содержание гелия в нем.

Контрольное опробование состава газа на месторождении следует проводить выборочно по скважинам, эксплуатирующим залежь, соблюдая не только единую методику отбора проб и их анализа, но также и условия опробования скважин.

При подсчете запасов гелия следует различать начальные и текущие запасы гелия. Исходными данными для подсчета начальных запасов гелия являются данные о средней степени гелиеносности газов и их запасах, полученные на стадии разведки или в самый начальный период эксплуатации месторождения. Текущие запасы гелия подсчитываются по месторождениям, находящимся в разработке. Для газовых и газоконденсатных залежей, а также залежей недонасыщенной нефти с водонапорным режимом подсчет текущих запасов гелия может производиться по данным о средней гелиеносности газов на рассматриваемый период эксплуатации и текущим запасам газа. Для залежей недонасыщенной нефти с неводонапорным режимом, а также залежей насыщенной нефти подсчет текущих запасов гелия может производиться только по разности между начальными запасами гелия и извлеченными при эксплуатации. Обусловлено это тем, что первоначальный состав пластового газа

и степень его гелиеносности в процессе эксплуатации таких месторождений резко меняются, и после падения пластового давления ниже давления насыщения правильно определены быть не могут.

Геологические запасы гелия в газовых, газоконденсатных и нефтяных залежах (независимо от режима эксплуатации) подсчитываются по формуле

$$Q_{\text{He}} = \frac{Q_{\text{r}}^{\text{He}}}{100},$$

где  $Q_{\text{He}}$  — геологические запасы гелия в недрах, тыс.  $\text{м}^3$ ;  $Q_{\text{r}}^{\text{He}}$  — геологические запасы газа, свободного или попутного, тыс.  $\text{м}^3$ ;  $\text{He}$  — среднее содержание гелия в газе, об. %.

На эксплуатируемых месторождениях учету подлежат текущие запасы гелия в недрах. В случае газовой, газоконденсатной залежи или залежи недонасыщенной нефти с водонапорным режимом текущие запасы гелия в недрах можно подсчитать по формуле

$$Q_{\text{He}}^{\text{т}} = \frac{Q_{\text{r}}^{\text{He}}}{100},$$

где  $Q_{\text{He}}^{\text{т}}$  — текущие запасы гелия в недрах, тыс.  $\text{м}^3$ ;  $Q_{\text{r}}^{\text{He}}$  — текущие запасы газа, свободного или попутного, в недрах, тыс.  $\text{м}^3$ .  $\text{He}$  — среднее содержание гелия в газе, об. %.

В случае нефтяной залежи с неводонапорным режимом текущие запасы гелия в недрах могут быть вычислены только как разность между начальными геологическими запасами гелия и извлеченными при эксплуатации

$$Q_{\text{He}}^{\text{т}} = Q_{\text{He}}^{\text{г}} - Q_{\text{He}}^{\text{извл}},$$

где  $Q_{\text{He}}^{\text{г}}$  — начальные геологические запасы гелия в недрах, тыс.  $\text{м}^3$ ;  $Q_{\text{He}}^{\text{извл}}$  — количество гелия, извлеченного из залежи с момента начала эксплуатации, тыс.  $\text{м}^3$ .

В некоторых случаях, например при проектировании добычи гелия из попутного газа, необходимо наряду с геологическими запасами вычислить извлекаемые запасы гелия в нефтяной залежи\*.

В залежах недонасыщенной нефти с водонапорным режимом извлекаемые запасы гелия подсчитываются по формуле

$$Q_{\text{He}}^{\text{извл}} = \frac{Q_{\text{r}}^{\text{He}}}{100},$$

где  $Q_{\text{He}}^{\text{извл}}$  — извлекаемые запасы гелия, тыс.  $\text{км}^3$ ;  $Q_{\text{r}}^{\text{He}}$  — извлекаемые запасы попутного газа, тыс.  $\text{м}^3$ .

В залежах недонасыщенной нефти с неводонапорным режимом, а также в залежах насыщенной нефти ( $P_{\text{пл}} = P_{\text{нас}}$ ) коэффициент газоотдачи обычно больше, чем коэффициент нефтеотдачи. При падении

\* В газовой залежи извлекаемые запасы газа, а следовательно, и гелия принимаются равными геологическим.

пластового давления в ходе эксплуатации ниже давления насыщения начинается разгазирование нефти в пласте, при этом гелий как наименее растворимый компонент попутного газа быстрее других выделится в газовую фазу, в связи с чем нефтяная залежь отдает почти весь гелий, растворенный в нефти.

Если подсчет запасов гелия в таких случаях произвести на основе данных об извлекаемых запасах попутных газов, то общая величина запасов гелия будет занижена.

Оценить процесс выделения гелия из нефтяной залежи при режиме растворенного газа можно с помощью расчетов по константам равновесия [Гороян, 1963; Жданов и Лисунов, 1959; Махмудов и Якуцени, 1965].

Подсчет геологических и извлекаемых запасов гелия в газонефтяной залежи производится отдельно: в газовой шапке по формуле подсчета запасов гелия в свободных газах, а в нефти — как в залежи насыщенной нефти. Затем запасы суммируют.

## Глава XI

### ДОБЫЧА ГЕЛИЯ И ОХРАНА ЕГО РЕСУРСОВ

Добыча гелия в промышленных масштабах осуществляется в настоящее время в трех странах мира — в СССР, США и Канаде, причем со все возрастающими темпами.

Области промышленного применения гелия постепенно расширяются, вместе с этим увеличивается и добыча гелия. Совершенствование методов промышленного извлечения гелия значительно снизило себестоимость его производства, но ограниченность сырьевой базы гелия держит промышленность на жестком гелиевом режиме, исключая возможность его использования в тех областях техники, где ему могут быть найдены заменители, и ограничивая его применение в тех областях, где замены гелию нет.

США, располагая почти всеми гелиевыми ресурсами капиталистического мира, искусственно поддерживают гелиевый голод, строго ограничивая экспорт гелия. В результате, если в США гелий добывают лишь из газов, содержащих свыше 0,30% гелия, то в Западной Европе представляется рентабельным извлечение гелия даже из нидерландских газов, концентрация гелия в которых не превышает 0,06%. Одновременно с запретом на экспорт гелия как стратегического сырья в США уничтожаются при утилизации без извлечения гелия огромные запасы природных газов, содержащих лишь несколько менее 0,30% гелия, т. е. безвозвратно теряются накопленные природой запасы столь уникального элемента как гелий, не имея в предвидении никаких реальных его восполнителей.

#### § 1. ИСТОЧНИКИ И СПОСОБЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЯ

Основным источником для промышленной добычи гелия являются гелиеносные природные газы как свободные, так и растворенные в нефтях. Страны, не располагающие ресурсами гелия, получают его в незначительных количествах попутно, вместе с неоном, на заводах сжижения воздуха. Гелий может быть выделен на таких заводах в чистом виде при разделении неон-гелиевой смеси, отбираемой из воздухо-разделительного аппарата. В связи с крайне низким содержанием гелия в воздухе (0,000524%) производительность на гелий даже наиболее крупных воздухо-разделительных установок очень незначительна.

Другим источником получения гелия могут являться минералы, обогащенные гелием, в частности монацитовые пески.

По данным Аямы и Канда [Aoyama, Kanda, 1941], среднее содержание гелия в 1 г монацитового руды месторождения Траванкор (Индия) составляет около 1 см<sup>3</sup>. Тейлор [Taylor, 1929], исследуя возможность получения гелия из монацитовых песков путем их прокаливании в закрытых сосудах до 1000° С, рассчитал, что из 100 т монацитового песка можно получить около 80 м<sup>3</sup> чистого гелия. Естественно, что масштабы добычи гелия из минералов не могут быть велики, даже при столь оптимальных условиях, которые существуют на месторождении Траванкор, поэтому промышленного значения этот метод получения гелия не имеет.

Много внимания уделялось вопросу извлечения гелия из газов, растворенных в подземных водах. Нередко эти газы характеризуются высокой гелиенасыщенностью, особенно газы, выделяющиеся спонтанно из вод горячих источников, но, как правило, свободные дебиты газов на таких источниках недостаточны для организации на их базе добычи гелия, а принудительное извлечение газов, растворенных в подземных водах, нерентабельно в связи с высокими энергетическими затратами на термовакуумирование огромных масс воды. В отдельных случаях может оказаться рентабельной добыча гелия из рудничных газов с повышенной гелиеносностью, особенно при высоких и устойчивых дебитах газа.

По мере израсходования запасов природных газов недр возрастет дефицитность гелия в будущем, поэтому уже ныне обсуждаются вопросы его получения из других источников.

Одним из обширнейших естественных резервуаров гелия является атмосфера, содержащая около  $4,5 \cdot 10^{13}$  м<sup>3</sup> гелия. Но чтобы получить 20 млн. м<sup>3</sup> гелия, потребляемых в настоящее время ежегодно только в США, нужно переработать около 7 триллионов кубометров воздуха в год (при 75% извлечения гелия), т. е. построить, например, 4600 воздуходелительных установок типа БР-2.

Для сравнения отметим, что один лишь гелиевый завод Кейес в США вырабатывает ежегодно 8,15 млн. м<sup>3</sup>, перерабатывая всего 720 млн. м<sup>3</sup> газа, содержащего 2% гелия в газе-сырце. Технико-экономическая несопоставимость извлечения гелия из обоих источников совершенно очевидна.

В ряде работ [Финкельштейн, 1961, и др.] приводятся подсчеты масштабов возможной в будущем утилизации синтетического гелия. Синтетический гелий — это продукт управляемой термоядерной реакции, основанной на слиянии протонов в ядре гелия. Осуществление этой реакции, видимо, дело недалекого будущего. Однако количество получаемого при этом гелия не будет велико, неясен также и процесс выделения и отвода гелия из будущего термоядерного реактора. Если представить, что технические трудности по осуществлению этого процесса будут преодолены и к началу XXI в. годовая выработка энергии термоядерными станциями мира составит 30 триллионов *квт · ч* (в настоящее время мировая выработка электрической энергии тепловыми и гидростанциями превышает 2 триллиона *квт · ч*), то побочным продуктом всех термоядерных станций

окажется всего лишь 1,7 млн. м<sup>3</sup> гелия, что в 10 раз меньше его современного годового потребления только в США.

Другие проекты получения гелия, как например, сжижение атмосферных газов Юпитера, обогащенных гелием, могут в настоящее время обсуждаться лишь в области научной фантастики [Азимов, 1965].

Таким образом, среди всех реальных источников получения гелия в промышленных масштабах наиболее ценным видом сырья являются природные газовые смеси, оценку кондиционности которых с точки зрения охраны сырья нужно производить с учетом не только современной потребности промышленности в гелии, но и будущей, учитывая невосполнимость этого наиболее рентабельного вида гелиевого сырья.

Все современные заводы по добыче гелия, работающие в СССР, США и Канаде, извлекают гелий из природных газов методом глубокого охлаждения. При этом все компоненты газовой смеси конденсируются, за исключением гелия.

Помимо методов криогенной ректификации природных газов для получения гелия могут быть использованы также и диффузионные методы. В основе этих методов лежит свойство высокой проницаемости гелия через различные перегородки. В качестве перегородок могут быть использованы как капиллярные трубки из специальных сортов стекла, так и мембраны из различных органических материалов.

В настоящее время диффузионные методы находятся еще в стадии разработки и не имеют практического значения [Фастовский, 1964].

## § 2. ДОБЫЧА ГЕЛИЯ ЗА РУБЕЖОМ

Впервые добыча гелия началась почти одновременно в Канаде и в США в 1917 г. В Канаде первый гелиедобывающий завод был построен по требованию английского адмиралтейства в г. Гамильтоне (Онтарио). Газ подавался с месторождения Блекхиз. Предполагалось заполнять гелием дирижабли объемом 140—170 тыс. м<sup>3</sup>. Однако уже в конце 1918 г. установка в связи с истощенностью запасов газа была перенесена в г. Калгари (Альберта), на месторождение Боу Айленд (He — 0,36%), где завод проработал до апреля 1920 г. и был закрыт. Всего было добыто за эти годы около 1,7 тыс. м<sup>3</sup> гелия [Лукашук, 1933].

В США первый завод был построен в Техасе на газах месторождения Петролия, в 1929 г. завод был закрыт вследствие истощения запасов, но уже в апреле этого же года в Амарилло (Техас) был введен в строй новый завод по добыче гелия. Перерабатывался газ месторождения Клифсайд, содержащий 1,8% гелия. Этот завод с 1929 по 1943 гг. был единственным гелиедобывающим заводом за рубежом. В период второй мировой войны было построено дополнительно еще четыре гелиедобывающих завода в США.

В настоящее время гелий категории А (99,995% чистоты) вырабатывается на пяти государственных заводах США — Амарилло, Экселл, Кейес, Отис, Навайо — и на одном частном заводе — Керр-Мак-Джи. Кроме того, гелий-сырец (60% чистоты) получают в США еще на пяти заводах — Буштон, Хансфорд, Улиссес, Думас и Либерал. Один завод по производству чистого гелия — Свифт-Каррент — построен и введен в эксплуатацию в 1963 г. в Канаде, второй канадский завод — Вуд-Маунтин — проектировали пустить в 1963 г., но сведения о его пуске в печати отсутствуют. Все гелиедобывающие заводы США, за исключением Керр-Мак-Джи и Навайо, работают на горючих газах, последние два — на азотных, в Канаде — также на азотных газах.

В конце 1966 г. кампанией Аламо-Кемикл должно быть закончено строительство еще одного крупного гелиедобывающего завода в Канзасе, перерабатывающего газы месторождений Гринвуд и Спарк. Масштабы добычи гелия в США до 1962 г. соответствовали потреблению его промышленностью этой страны и составляли в 1961 г. около 16 млн. м<sup>3</sup>. Начиная с 1963 г. добыча гелия превысила его потребление. Весь избыточный относительно потребления гелий закачивается в государственное гелиегазохранилище в Клиф-сайде на хранение для будущего использования.

В табл. 63 приведены данные, характеризующие динамику роста добычи гелия в США с 1921 по 1963 гг., а в табл. 64 указано изменение потребления гелия в США с 1950 по 1965 гг. Практически эти же цифры характеризуют добычу и потребление гелия в целом за рубежом, так как завод Свифт-Каррент, начавший работать с 1963 г. с годовой добычей в 1965 г. около 170 тыс. м<sup>3</sup> гелия, мало изменяет общие цифры добычи гелия в США; никаких других гелиедобывающих заводов за рубежом до 1966 г. не было.

Таблица 63

Производство гелия в США  
[Фастовский и др., 1964; Lipper, 1963]

Год	Производство, млн. м <sup>3</sup>	Год	Производство, млн. м <sup>3</sup>
1921	0,057	1958	9,458
1925	0,252	1959	13,499
1930	0,277	1960	18,169
1935	0,289	1961	20,580
1940	0,328	1962	19,330
1945	2,680	1963	63,090
1950	2,304		
1955	6,246		
		Всего	156,559

В последующие годы ожидается дальнейшее увеличение объема потребления гелия в США. На рис. 32 приведен график, иллюстрирующий масштабы будущего производства гелия в США.

Таблица 64

Потребление гелия в США  
с 1950 по 1965 гг.

Год	Потребление, млн. м <sup>3</sup>	Год	Потребление, млн. м <sup>3</sup>
1950	2,29	1958	9,96
1951	3,08	1959	10,61
1952	4,10	1960	13,44
1953	4,47	1961	15,59
1954	5,38	1962	17,83
1955	6,68	1963	18,94
1956	7,56	1964	Нет сведений
1957	8,77	1965	19,81

Почти весь добываемый за рубежом гелий потребляется в США. Еще в годы первой мировой войны гелий был внесен США в список стратегических товаров и его экспорт запрещен. Гелий разрешено вывозить только в строго ограниченных количествах на научно-исследовательские и медицинские цели. Это положение с продажей

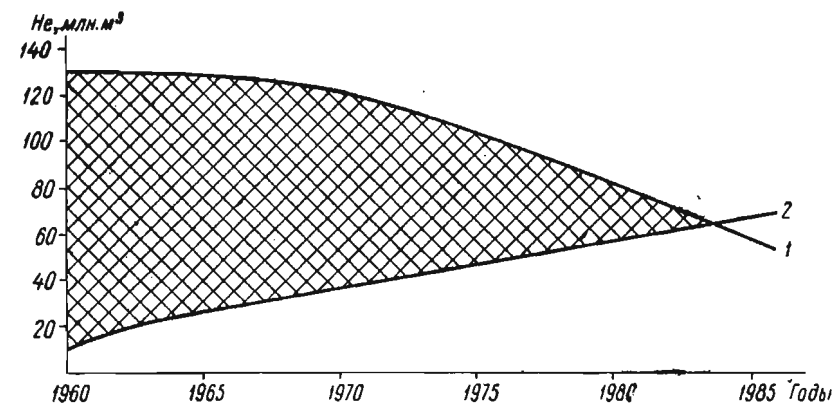


Рис. 32. Динамика предполагаемого изменения объемов потребления гелия в США и расхода запасов гелия, законсервированных в гелиехранилище (Chem. and eng. news, march, 1960).

1 — запасы гелия в гелиехранилище (проектные); 2 — предполагаемый спрос; затриховано — гелий в гелиехранилищах, добываемый по программе консервации и используемый по мере необходимости (по проекту 1959 г.).

гелия сохранилось и ныне. В 1962 г. всего было экспортировано 256,45 тыс. м<sup>3</sup> гелия. Естественно, что жесткий гелиевый режим вынудил страны, заинтересованные в нем, искать выход из создавшегося положения. В результате на средства международных компаний был построен гелиевый завод в Канаде (Свифт-Каррент), продукция которого предназначалась почти полностью на экспорт. Первые 1,2 тыс. м<sup>3</sup> гелия Канада продала уже в 1963 г., в 1965 г. предполагалось экспортировать 255 тыс. м<sup>3</sup> гелия. По мнению Рида



[Oilweek, 1965], после строительства нидерландского гелиевого завода европейский рынок для канадского гелия будет закрыт.

Совершенствование технического цикла извлечения гелия значительно снизило его себестоимость. Если в 1921 г. стоимость получения 1 м<sup>3</sup> гелия составила 17,2 долл. [Kauter, 1962], то себестоимость гелия, получаемого ныне на заводе Кейес, составляет всего 0,3 долл. [Дитон и др., 1961].

Однако отпускная цена гелия в США значительно выше и составляет с осени 1961 г. после ввода в действие закона об охране ресурсов гелия 1,24 долл. Еще выше стоимость гелия, доставляемого в другие страны. Так, по данным [Hugo, 1963], стоимость гелия, поставляемого в ЮАР, составила в 1961 г. около 5,66 долл. за 1 м<sup>3</sup>.

### § 3. ОХРАНА РЕСУРСОВ ГЕЛИЯ

Выше нами отмечалось, что единственным источником рентабельного получения гелия в промышленных масштабах являются природные газы, обогащенные гелием.

Широкая интенсификация добычи природных газов во всем мире, используемых в качестве топлива и химического сырья без предварительного извлечения гелия, приведет в не столь отдаленном будущем к потере этого уникального вида гелиевого сырья; тогда как потребность в гелии непрерывно возрастает и будет расти дальше вместе с дальнейшим техническим прогрессом человечества.

В соответствии с прогнозными данными в 1982 г. потребление гелия только в США достигнет примерно 60 млн. м<sup>3</sup> [Инженер-нефтяник, № 2, 1964] и будет возрастать дальше (см. рис. 32). Никаких реальных источников дополнительного получения гелия во все возрастающих масштабах в будущем нет. Следовательно, задача охраны природных гелиеносных газов является настоятельной необходимостью сегодняшнего дня, причем, чем раньше будут приняты меры по охране гелиевых ресурсов, тем больше его будет сбережено для тех отраслей промышленности, где ему нет замены, но развитие которых еще только начинается.

Наиболее действенными мерами по охране гелиевых ресурсов следует считать следующие: запрещение эксплуатации запасов природных газов с кондиционной гелиеносностью без предварительного извлечения из них гелия; создание резервов гелия в подземных гелиегазохранилищах за счет переработки всего объема добываемых запасов газов с кондиционной гелиеносностью и, наконец, рациональное использование гелиевых ресурсов.

При запрещении разработки запасов природных газов того или иного месторождения без предварительного извлечения гелия необходимо руководствоваться как необходимостью охраны ресурсов гелия, так и рентабельностью переработки газов, с тем чтобы не замораживать запасы природных газов, запрещая ввод их в эксплуатацию, но и не терять при их утилизации существенных запасов гелия.

Оценочные параметры месторождений природных газов, запасы гелия которых должны подлежать охране, не являются постоянными

и меняются в зависимости от многих факторов, в частности таких, как состояние ресурсов гелия той или иной страны, ее потребности в этом виде сырья, уровня ее технического прогресса и т. п.

В США с целью охраны ресурсов гелия, быстро истощающихся в связи с интенсивной утилизацией природных газов, с 1961 г. введена в действие долгосрочная программа сохранения запасов гелия. Ресурсы гелия в США достаточно велики, по данным Муллинса [1961], они составляли на июль 1960 г. около 5,6 млрд. м<sup>3</sup>, но почти все они содержатся в природных газах Мидконтинента, на месторождениях, ныне интенсивно разрабатываемых (Хьюгтон-Пенхендл, Кейес, Гринвуд и Клифсайд). Учитывались только запасы газов, содержащих от 0,300% гелия и более. По подсчетам американских специалистов уже примерно через 25 лет будут почти полностью выработаны наиболее ценные с промышленной точки зрения запасы гелиеносных газов. В связи с этим в 1958 г. Министерством внутренних дел США была разработана долгосрочная программа охраны ресурсов гелия, которая была принята Конгрессом, утверждена президентом США и с марта 1961 г. вступила в действие (Гелиевый закон).

В соответствии с этой программой частным компаниям было предложено построить ряд гелиевых заводов на магистральных газопроводах с целью извлечения гелия из транспортируемых газов до поступления их на рынок сбыта. Компаниям была оказана финансовая помощь, правительство обязалось покупать по долгосрочным контрактам сырой гелий (70% чистоты), транспортировать и хранить его на контролируемом правительством газовом месторождении Клифсайд, около Амарилло, превращенном в подземное гелиегазохранилище. Заводы для извлечения гелия-сырца должны за 22 года продать правительству 1,77 млрд. м<sup>3</sup> гелия [Pylant, 1962]. В целом же по программе сохранения гелия, рассчитанной на 25 лет, запланировано закупить 2,490 млрд. м<sup>3</sup> гелия; если потребность в гелии за этот период не превысит ожидаемых 1,019 млрд. м<sup>3</sup>, то около 1,471 млрд. м<sup>3</sup> гелия будет сохранено в США для будущего использования. Программой предполагается обеспечивать потребность страны в гелии далее 2000 г. [Richardson, 1962].

Необходимо отметить, что эта программа предусматривает охрану только запасов гелиеносных газов с концентрацией гелия от 0,4% и более, запасы газов с меньшей концентрацией безвозвратно теряются.

Выше уже неоднократно отмечалось, что области применения столь уникального по своим свойствам элемента, как гелий, чрезвычайно широки, в дальнейшем они будут расширяться вместе с прогрессом в развитии электроники, атомной и других областей промышленности, определяющих уровень технического развития страны. Трудно предусмотреть все те новые области применения, которые будут найдены для гелия в ближайшем и более удаленном будущем человека, но несомненно, что еще не однажды придется столкнуться с его дефицитностью, особенно в тех областях промышленности, в которых он не может быть ничем заменен.

## ЛИТЕРАТУРА

Адамс Дж. Радиоактивность литосферы. В кн. Ядерн. геофизика. М. Мир, 1964.

Азимов А. Вид с высоты. М., Мир, 1965.

Алекперов Р. А., Эфендиев Г. Х. О содержании урана в нефтях. Геохимия, № 6, 1959.

Антонов П. Л. К изучению закономерностей распределения газонасыщенности горных пород с глубиной. В сб. Геол. и геохим. исследования. Тр. ВНИГНИ, вып. 10, 1958.

Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли. М., Гидрометеонадат, 1958.

Баранов В. И. Радиометрия. М., Изд-во АН СССР, 1956.

Баранов В. И., Кузьмина Л. А. Скорость отложения илов Индийского океана. Геохимия, № 2, 1958.

Баранов В. И., Ронов А. Б., Кунашева К. Г. К геохимии рассеянного тория и урана в глинах и карбонатных породах Русской платформы. Геохимия, № 3, 1956.

Бараненко С. Е., Бурных Н. М. Газовое дело, № 8, 1962.

Бейтс Д. Р. Состав и строение атмосферы. В кн. Планета Земля. М., ИЛ, 1961 (1957).

Бейтс Д. Р., Паттерсон Т. Н. Ионы гелия в верхней атмосфере. В кн. Элементарные процессы в верхней атмосфере. М., Мир, 1965.

Белл К. Ж. Уран и торий в осадочных породах. Ядерная геология. М., ИЛ, 1956.

Белоусов В. В. К вопросу о геологических условиях гелиеносности. Пробл. сов. геологии, т. 3, № 8, 1933.

Белоусов В. В. Вопросы геологии гелия. Тр. Геол.-развед. бюро газ. месторожд., вып. 6, ОНТИ, 1934.

Билибин Ю. А. Металлогенические провинции и эпохи. Госгеолтехиздат, 1957.

Бочкова О. П., Шрейдер Е. Я. Спектральный анализ газовых смесей. М., Физматгиз, 1963.

Брегер И. А., Дьюл М. Органическая геохимия урана. В сб. Геология атомн. сырья. мат-лов. М., Госгеолтехиздат, 1956.

Брод И. О. и др. Нефтегазонасыщенные бассейны земного шара. М., Недра, 1965.

Буллен К. Сейсмология и внутреннее строение Земли в целом. В кн. Физика и химия Земли. М., ИЛ, 1958.

Бурксер Е. С. и др. Радиоактивность каменных углей Донецкого бассейна. Укр. хим. ж., № 9, кн. 3—4, 1934.

Баррер Р. Диффузия в твердых телах. М., ИЛ, 1948.

Быховер Н. А. Минеральные ресурсы капиталистических стран. Недра, 1964.

Вернадский В. И. Опыт описательной минералогии, Избр. соч., т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1955.

Верхуген И. Температура в недрах Земли. В кн. Физика и химия Земли. М., ИЛ, 1958.

Виноградов А. П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре. Геохимия, № 1, 1956.

Виноградов А. П. Изотопный состав пород Земли и метеоритов, Атомная энергия, 5, 1958.

Виноградов А. П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры. Геохимия, № 7, 1962.

Виноградов А. П. Основные черты геохимии урана. М., Изд-во АН СССР, 1963.

Виноградов А. П. Газовый режим Земли. Химия земной коры, т. 2. М., Наука, 1964.

Войткевич Г. В. Радиогеология и ее значение в познании Земли. М., Госгеолтехиздат, 1956.

Вяльцев А. Н. Легчайшие атомные ядра. М., Изд-во АН СССР, 1963.

Гелий — ракетное топливо? Техника молодежи, № 4, 1961.

Герлинг Э. К. Прикладная химия. VI, вып. 6, 1153, 1933.

Герлинг Э. К. Попытка обнаружить гелиевое дыхание Земли. В сб., посвященном акад. В. И. Вернадскому, т. 1. Изд-во АН СССР, 1936.

Герлинг Э. К. Роль плотности упаковки кристаллов при диффузии гелия. ДАН СССР, т. 24, № 3, 1939.

Герлинг Э. К. О растворимости гелия в расплавах. ДАН СССР, 27, № 1, 1940.

Герлинг Э. К. Теплопроводность гелия как критерий пригодности минералов для определения возраста по гелиевому методу. М., Изд-во АН СССР, 1957а. (Тр. Радиового ин-та, т. 5, вып. 2.)

Герлинг Э. К. Миграция гелия из минералов и пород. М., Изд-во АН СССР, 1957б. (Тр. Радиового ин-та, т. 6.)

Гинзбург В. Л., Фрадкин М. И. Происхождение космических лучей. В сб. В глубь атома. М., Наука, 1964.

Глестон С. Атом, атомное ядро, атомная энергия. М., ИЛ, 1961.

Гороян В. И. Изучение процессов разгазирования нефти. М., Госгостехиздат, 1963.

Граф Л., Тот Ж. Газовая хроматография в 1961 г. М., Госгостехиздат, 1963.

Грю К. Э., Иббс Т. Л. Термическая диффузия в газах. М., Госгостехиздат, 1956 (пер. с англ., 1952).

Дин Д. В., Лауф Р. Е. Месторождение гелиеносных газов в районе Четырех Углов (США). В сб. Добыча, производство и применение гелия в США, № 1. Газовое дело, ГосИНТИ, 1961.

Динс Д., Винайрд Д. Радиационные эффекты в твердых телах. М., ИЛ, 1960.

Дитон В. М., Хейнес Р. Д. Завод по производству гелия в Кейсе. Добыча, производство и применение гелия в США. В сб. переводов, № 1. Газовое дело, ГосИНТИ, 1961.

Ерминова Б. Г. Растворимость одноатомных газов и азота. Л., Изд-во ЛГУ, 1950.

Завод Либерал. Инженер-нефтяник, № 2, 1964.

Зайт В. Диффузия в металлах. М., ИЛ, 1958.

Ингерсон И. Нерадиоактивные изотопы в геологии. В кн. Изотопы в геологии. М., ИЛ, 1954.

Инструкция по учету запасов гелия в газовых, газонефтяных и нефтяных месторождениях. Госгеолтехиздат, 1956.

Ирдли А. Структурная геология Северной Америки. М., ИЛ, 1954.

Кеезом В. Гелий. М., ИЛ, 1949.

Керр П. Ф. Месторождения урана и тория. В сб. Геология атомн. сырья. мат-лов. М., Госгеолтехиздат, 1956.

Кесарев В. В. Как живут и умирают планеты. Авиация и космонавтика, № 3, 1964.

Клеппер М. Р., Уайнт Д. Г. Урановые провинции. В сб. Геология атомн. сырья. мат-лов. М., Госгеолтехиздат, 1956.

Ковалевский А. Л. О зависимости радиоактивности и содержаний химических элементов от механического состава осадочных горных пород. Геохимия, № 3, 1966.

Козлов А. Л. Вопросы геохимии природных газов и генезис гелиевых месторождений. ОНТИ, 1940.

Козлов А. Л. Проблемы геохимии природных газов. Госгостехиздат, 1950.

Койпер Д. П. Атмосфера Земли и планет. М., ИЛ, (1947) 1951.

Константинов М. М., Куликова Е. Я. Урановые провинции. М., Атомиздат, 1960.

Косци Ф. Ф., Рошольт, Дж. Н. Радиоактивность в океанографии. В кн. Ядерн. геофизика. М., Мир, 1964 (1962).

Красников В. И. Геологические предпосылки поисков месторождений урана. М., Атомиздат, 1964.

Крейтер В. М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Ч. 1. М., Гостеолтехиздат, 1960.

Крылов А. Я., Тр. III сессии Ком. по опр. абс. возр. геол. формаций. М., Изд-во АН СССР, 1955.

Крылов А. Я., Барановская Н. В., Ловцюс Г. П. Тр. V сессии Ком. по опр. абс. возр. геолог. формаций. М., Изд-во АН СССР, 1958.

Курц М. К. Геология месторождений азота и углеводородов в районе мульт Зенгерхаус и Мансфельд. Реф. ж., Геология, № 7, 1963.

Ларсен Е. С., Фейер Ж., Распределение урана и тория в интрузивных породах. В кн. Ядерн. геология. М., ИЛ, 1956.

Линд С. Радиационно-химические процессы в газах. М., Атомиздат, 1965.

Лукашук А. И. Гелий, его применение и добыча. ОНТИ, 1925.

Лукашук А. И. Нахождение и добыча гелия. Госхимтехиздат, 1933.

Льбимова Е. А. Термическая история и температура Земли. Бюлл. МОИП, отд. геол., № 4, 1958.

Маккелви В. И., Эверхарт Д. Л., Гаррелс Р. М. Обзор гипотез о генезисе урановых месторождений. В сб. Геология атомн. сырья. мат-лов. М., Гостеолтехиздат, 1956.

Махмудов А. Х., Якуцени В. П. Методы подсчета запасов гелия. Нефтегазовая геология и геофизика, № 10, 1965.

Миллер С. Л. Синтез органических соединений в атмосфере первичной Земли. Геохим. симпозиум при V Всемирн. нефт. конгрессе. Гостоптехиздат, 1960.

Миртов Б. А. Газовый состав атмосферы Земли и методы его анализа. Изд-во АН СССР, 1961.

Митрофанов В. З. Разработка и применение масс-спектрального метода при изучении изотопов гелия — 4 и аргона — 40 в подземных водах, нефтях и природных газах Волгоградского Поволжья. Автореф. на соиск. ст. канд. наук. Ин-т геохимии и аналит. химии АН СССР, 1966.

Митрофанов В. З., Макаров А. А. Методика определения редких газов на масс-спектрометре МИ-1305. Л., Недра, 1964а. (Тр. ВНИИНГ, вып. 3.)

Митрофанов В. З., Макаров А. А. Масс-спектрометрическое определение гелия и аргона в природных газах. ЖАХ, 19, вып. 11, 1372, 1964б.

Мишина М. А., Авдеева О. И., Божковская Т. К. Растворимость газов в природных водах в зависимости от температуры, давления и солевого состава. Мат-лы ВСЕГЕИ, вып. 46. Л., ОНТИ, 1961.

Муллинс П. В. Рост производства и потребления гелия. Сб. переводов, № 1. Газовое дело, ГосИНТИ, 1961.

Мусиченко Н. И. Усовершенствование течеискателей для определения содержания гелия. Нефтегаз. геология и геофизика. Текущая информация, № 10, 1964.

Намиот А. Ю. Растворимость газов в воде под давлением. М., Гостоптехиздат, 1963.

Намиот А. Ю., Бондарева М. М. Расчет растворимости природного газа в пластовых водах. М., Гостоптехиздат, 1959 (Тр. ВНИИ, вып. 21).

Намиот А. Ю., Бондарева М. М. Растворимость в воде аргона и его смесей с метаном при высоких давлениях. М., Гостоптехиздат, 1961. (Тр. ВНИИ, вып. 24.)

Несмелова З. Н. О газах в калийных солях Березниковского рудника. Тр. ВНИИГ, вып. 35, 1959.

Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные методы разведки. Л., Недра, 1965.

Ньютон Р., Роунд Г. Ф. Диффузия гелия в осадочных породах. Геохимия, № 4, 1961.

Олдрич Л. Т., Нир А. О. Нахождение Ne<sup>3</sup> в природных источниках гелия. Изотопы в геологии. Сб. статей. М., ИЛ, 1954.

Осипов Ю. Г., Яницкий И. Н. Некоторые особенности формирования зон регионального гелиенасыщения. Геохимия, № 1, 1966.

Панет Ф., Гелен Х., Петерс К. О содержании гелия в природных газах. В кн. Основные идеи геохимии, вып. 2. М., ИЛ, 1935.

Пенчев Н. П. Количественные соотношения гелий — аргон (я He — N<sub>2</sub>) в качестве геохимической и геохронологической характеристики болгарских природных газов и минеральных вод. Годишник Соф. ун-та, хим. фак., 56, 1961 (1962, 1963).

Петров П., Пенчева Е., Павлова В. Геохимические исследования природных газов термальных источников в долине р. Струмы. Изв. геол. ин-та «Страшимир Димитров». БАН, 12, 1963.

Пирс А. Р., Миттон Д. В., Готт Г. В. Радиоактивные элементы и их дочерние продукты в Техасе, Пенхэнгле и в других месторождениях нефти и газа США. Мат-лы Междунар. конф. по мирн. использов. атомн. энергии в Женеве, т. 6. М., Гостеолтехиздат, 1958.

Пирс А. Р., Миттон Д. В., Барнет П. Геохимия урана в органических веществах нефтеносных пород. Тр. II Междунар. конф. по мирн. использов. атомной энергии в Женеве, т. 8. М., Атомиздат, 1959.

Природные газы СССР. Сб. статей под ред. И. М. Губкина, А. Е. Ферсмана и Б. С. Швецова, вып. 1—25. М., Госхимтехиздат, 1933—1935.

Путилов К. А. Курс физики, т. 1. М., Физматгиз, 1959.

Рауковский Н. К. Механический состав россыпного золота и новые данные по методике подсчета запасов россыпей. Сов. золотопромышленность, № 12, 1939.

Рамзай У. Благородные и радиоактивные газы. Одесса, Матезис, 1909.

Ранкама К. Изотопы в геологии. М., ИЛ, 1956.

Ривкин С. Л. Термодинамические свойства газов. М.—Л., Энергия, 1964.

Роджерс Д. Ш. Гелиеносные природные газы. М.—Л., ОНТИ, 1935.

Рухин Л. Б. Распространение и состав осадочных пород. Справ. руководство по петрографии осадочных пород, т. 1. М., Гостеолтехиздат, 1958.

Рухин Л. Б. Основы литологии. Л., Гостоптехиздат, 1961.

Савченко В. П. К вопросу о геохимии гелия. В сб. Природные газы, 9. ОНТИ, 1935.

Савченко В. П. Законы, управляющие системой жидкость — газы, и их приложение для выяснения генезиса природных газов. В сб. Природные газы, 11, 1936.

Савченко В. П. Аргон и гелий как индикаторы условий происхождения нефти и газа и формирования их залежей. Газовая промышленность, № 5, 1958.

Савченко В. П., Козлов А. Л. О газовой съемке. Нефтяное хозяйство, № 7, 1938.

Сауков А. А. Радиоактивные элементы Земли. М., Госатомиздат, 1961.

Сауков А. А. Геохимия. М., Наука, 1966.

Сериков Ю. И. Естественная радиоактивность мезозойских отложений Терско-Кумской равнины. Промысловая геофизика, 1963.

Соколов В. А. Гелий и другие редкие газы. Л.—М., ОНТИ, 1936.

Соколов В. А. Анализ газов. М., Гостоптехиздат, 1950.

Соколов В. А. Миграция газа и нефти. М., Изд-во АН СССР, 1956.

Старик И. Е. Ядерная геохронология. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1961.

Суббота М. И., Корабельников М. А., Жуков С. Г. Геохимия газов грязевых вулканов. Геохим. и геомикробиол. методы поисков нефти и газа. М., ЦНИИТЭНефтегаз, 1963.

Тихомирова Н. С., Малинский Ю. М., Карпов В. Л. Исследование диффузионных процессов в полимерах Высокомолекулярные соединения, т. 2, вып. 2. 1960.

Токарев А. Н., Щербачев А. В. Радиогеология. М., Гостеолтехиздат, 1956.

Тыминский В. Г., Салменкова Н. А. Возможности применения гелиевого метода в нефтяной геологии. Нефтегаз. геология и геофизика, № 10, 1965.

Уайт Д. Е., Уоринг Г. А. Вулканические эманации. В кн. геохимия совр. поствулкан. процессов. М., Мир, 1965.

Фастовский В. Г. Редкие газы. Госхимиздат, 1940.

Фастовский В. Г., Ровинский А. Е., Петровский Ю. В. Инертные газы. М., Атомиздат, 1964.

Финкельштейн Д. Н. Инертные газы. Науч.-попул. сер. М., Изд-во АН СССР, 1961.

Флоренский К. П. О соотношениях инертных газов и азота в природных газах. Геохимия, № 3, 1956а.

Флоренский К. П. Инертные газы в геохимических исследованиях природных газов. Вестн. АН СССР, № 6, 1956б.

Флоренский К. П. Проблема космической пыли и современное изучение тунгусского метеорита. Геохимия, № 3, 1963.

Хайн В. Е. Общая геотектоника М., Недра, 1964.

Хайд Р. Гидродинамика земного ядра. В сб. Физика и химия Земли. М., ИЛ, 1958.

Харлей П. М. Гелиевый метод определения возраста. Ядерная геология. М., ИЛ, 1956.

Хейл В. Д., Майерс А. Г., Хорр С. А. Уран в асфальтсодержащих породах. Мат-лы Междунар. конф. по мирн. использов. атомн. энергии в Женеве, т. 6. Госгеолтехиздат, 1958.

Хлопин В. Г., Абидов С. А. Радиоактивность и содержание гелия в бериллиевых, борных и литиевых минералах СССР. ДАН СССР, 32, 637, 1941.

Хлопин В. Г.; Герлинг Э. К. Природные газы, № 4—5. Л.—М., ОНТИ, 1932.

Хлопин В. Г., Герлинг Э. К. Новые данные о геохимии инертных и благородных газов. ДАН СССР, т. 61, № 2, 1948.

Хлопин В. Г., Герлинг Э. К., Иоффе Э. М. Исследования над выделением гелия из минералов и горных пород. Избр. тр., т. 2. М., Изд-во АН СССР, 1957.

Челищев Н. Ф. О диффузионном эффекте, обусловленном градиентом давления. ДАН СССР, т. 163, № 2, 1965.

Черепеников А. А. Природные газы, № 2, Л.—М., ОНТИ, 1931.

Черепеников А. А. Природные газы, № 9, Л.—М., ОНТИ, 1935.

Черепеников А. А. Растворимость инертных газов в нефтях. Геохим. сб., № 2—3. М., Гостоптехиздат, 1951а.

Черепеников А. А. Руководство по опробованию и анализу природных газов. М., Госгеолтехиздат, 1951б.

Черепеников А. А. Определение коэффициентов растворимости газов в водных растворах солей. Сб. докл. на XVI науч. конф. ЛИСИ, 1958.

Чердынцев В. В., Козак Л. В. О происхождении избыточного гелия в некоторых минералах. ДАН СССР, 69, 829, 1949.

Чердынцев В. В. Распространенность химических элементов. М., Гостехиздат, 1956.

Чердынцев В. В. и др. Неравновесный уран в карбонатных отложениях и определение их возраста. Геохимия, № 2, 1966.

Шингляр М. Газовая хроматография в практике. М., Химия, 1964.

Щербина В. В. Комплексные соединения и перенос химических элементов в зоне гипергенеза. Геохимия, № 5, 1956.

Эрикссон Э. Радиоактивность в гидрологии. В кн. Ядерная геофизика. М., Мир, 1964.

Юяге Х. Химический состав и радиоактивность атмосферы. М., Мир, 1965.

Ядерная геология. М., ИЛ, 1956.

Якуцени В. П. Закономерности формирования залежей гелиеносных газов. Л., Гостоптехиздат, 1963.

Якуцени В. П. Принципы классификации природных газов по степени их гелиенасыщенности. Геология нефти и газа, № 8, 1965.

Якуцени В. П., Петровская Н. Л. Добыча гелия в капиталистических странах. Газовая промышленность, № 11, 1964.

Якуцени В. П., Петровская Н. Л. Размещение зон регионального гелиенакопления на Земле. Сов. геология, № 1, 1965.

Adams I. S. A., Osmond I. K., Rogers J. J. W. The geochemistry of thorium and uranium. Phys. and chem. Earth, 3, 1959.

Ahrens L. H. A fundamental law of geochemistry. Nature, vol. 172, № 4390, 1953.

Alvarez L. W., Cornog R. He<sup>3</sup> in helium. Phys. rev., 56, 379, 1939а.

Alvarez L. W., Cornog R. Helium and hydrogen of masses 3. Phys. rev., 56, 613, 1939б.

Anderson I. S. Chemistry of the Earth. J. Proc. Roy. soc. N. S. Wales, 76, 329—345, 1945.

Anderson I. S. J. Proc. Roy. soc. N. S. Wales, 76, 329 (1945).

Anderson C. C., Hinson H. H. Helium-bearing natural gases of the United States. Analises and analytical methods. Bur. min., bul. 486. Wash., 1951.

Aoyama S., Kanda E. J. Chem. soc. Japan, 62, 308, 1941.

Barber C. T. The natural gas resources of Byrma. Mem. Geol. surv. of India, vol. 66, p. 1, 1935.

Bauer C., Huntleyr E. Nature, 161, 356, 1948.

Beers R. F. Radioactivity and organic content of some paleozoic shales. BAAPG, 29, 1—22, 1945.

Bergmann F. L. Naturforschung, 14a, 333, 1959.

Boone W. J. Helium-bearing natural gases of the United States. Analises and analytical methods. Bur. min., bul. 576, Wash., 1958.

Bowie S. H. Helium in natural gas in the Witwatersrand. Nature, 182, № 4642, 1958.

Brown H. Rev. mod. phys. 21, 625, 1949.

Canadian helium to lose present markets in Europe Oilweek, vol. 13, № 36, 1965.

Carr D. R., Kulp J. L. Age of a Mid-Atlantic Ridge basalt boulder. Bull. Geol. soc. Amer., 64, 253, 1953.

Clever H. L. J. phys. chem., vol. 61, 375, 1958.

Cook G. Ed. Argon, helium and the rare gases. Vol. 1, 2. Intersci. publ. N. Y. — Lond., 1961.

Cook M. A. Where is the Earth's radiogenic Helium? Nature, 179, № 4552, 1957.

Damon P. E., Kulp I. L. Inert gases and the evolution of the atmosphere. Geochim. cosmochim. acta, vol. 13, 1958, стр. 280—292.

Damon P. E. Terrestrial helium. Geochim. cosmochim. acta, vol. 11, № 3, 1957.

Dobbin C. E. Geology of natural gases rich in helium, nitrogen, carbon dioxide and hydrogen sulphide. Geol. natur. gas., 1935.

Dubey V., Holmes A. Nature, 123, 794, 1929.

Duffendack O., Wolf R. Proc. of the sixth Summ. conf. on spectr., 66, 1939.

Elworthy R. T. Helium in Kanada. Ottawa, 1926.

Fireman E. L. Measurement of the (h, H<sup>3</sup>) cross section in nitrogen and its relationship to the tritium production in the atmosphere. Phys. rev., 91, № 4, 1953 (922).

Fowler W. A. The origin of the elements. Sci. month., 84, 84—100, 1957.

Gnauck G., Frenzel T. Chem. geol. bull., № 9, 1959.

Greenstein I. L., A search for He<sup>3</sup> in the Sun. Astrophys. j., 113, 531, 1951.

Harris J. F. Geological investigations, sampling and diamond-drilling at Manyehy helium-bearing hot spring, Singida district. Tanganyika geol. surv. rec., vol. 8, 1958.

Harris J. F. Helium-bearing and other natural gases. Summary of the geology of Tanganyika. P. IV, Econ. geol., 1961.

Hedemann H. A. Zur Frageder Kohlenwasserstoff gase in Oberkarbon. Erdöl und Kohle ordgas. T. 8, 1963.

Hitchon B. Geochemical studies of natural gases. P. III, Inert gases in Western Canadian natural gases. J. Canad. petrol. technol., 2, № 4, 1963.

Holland H. D., Kulp I. L. The transport and deposition of uranium, ionium and radium in rivers, oceans and ocean-sediments. Geochim. cosmochim. acta, 5, № 5, 1954.

Holmes A. Arevised estimate of the age of the Earth. Nature, 159, 1947.

Hugo P. J. Helium in the Orange Free States Goldfield. Dep. of mines. Bull. geol. surv. S. Afr., № 39, 1963.

Hugo P. J. The Evander gas-field. Dep. of mines. Bull. geol. surv. S. Afr., № 41, 1964.

Hurley P. M. Alpha ionization damage as a cause of low helium rations. Trans. Amer. geophys. union, 33, 174, 1952.

Hurley P., Goodman C. Bull. Geol. soc. Amer., 54, 305, 1943.

Hurley P. M. Progress report on age measurements. Trans. Amer. geophys. union, 31, 142, 1950.

Ion D. C. Discussion. Proc. Third World petrol. congress, sect. 1, 427, 1951.

James T. C. Helium and hot spring investigation. Rec. Geol. surv. Tanganyika, vol. VII, 1957a (1959).

James T. C. Occurences of helium-bearing gases in Musoma and North Mara districts, Lake Province. Rec. geol. surv. Tanganyika, vol. 7, 1957b (1959).

Janak J., Tesarik K. Kollektion of Chehoslovac chemical communications. 2, 1955.

J. Canad. chem. Proc., vol. 46, № 3, 1962.

Junge C. E. Atmospheric chemistry. Adv. geophys., 4, 49, 1958.

Kauter K. Zum Rohstoff Helium. Z. Angew. Geol. 8, № 7, 1962.

Keevil N. B. Amer. geophys. union, NRS, 11, 501, 1941.

Keevil N. B. Amer. j. sci., 240, 13, 1942.

Klingspor A. M. Helium and nitrogen in Saskatchewan, Canad. min. metallurg. bull., vol. 54, № 594, 1961.

Kuonen P. H. Geochemical calculation concerning the total mass of sediments in the Earth. Amer. j. sci., vol. 239, 1941.

Lovering I. F., Morgan I. W. Comparative uranium and thorium analises of basic and ultrabasic rocks. Nature, № 4892, 1963.

McLennan J. C. Report on some sources of helium in the British Empire. Canada dep. min. bull., 31, 1920.

Lipper H. W. Helium. Miner. yearbook, vol. 11, 1963.

Marincovic S. Helium content of several Jugoslav natural gases. Ref. chem. abstr., vol. 54, 1960.

Mason B. Principles of Geochemistry, 2nd ed Wiley, N. Y., 1958.

Mayer-Gürr A. Helium Entstehung und Vorkommen. Z. varein. Dtsch. Ingr, № 5, Bd 84, 1940.

Mayne K. I. Terrestrial helium. Geochim. cosmochim. acta, vol. 9, № 4, 1956.

Mayne K. I. Terrestrial helium. A reply. Geochim. cosmochim. acta, vol. 11, № 3, 1957.

Menzel D. H. Pub. Lick. Obs., 1931 in H. Urey. Cosmic abundances of the elements and chemical composition of the solar system. Amer. sci., vol. 33, № 4, 1951.

Miller R. D., Norrell G. P. Analises of natural gases of the United States 1962. Information circular 8239. Bur. mines, 1964.

Morrison P., Pine J. Radiogenic origin of the helium isotopes. Annals N. Y., Acad. sci., vol. 62, № 3, 1955, p. 69-92.

Morrison T. J., Johnston N. B. Solubilities of inert gases in water. J. Amer. chem. soc., X, 3441, 1954.

Munnerlyn R. D., Miller R. D. Helium-bearing natural gases of the United States. Analises, second supplement to bull. 486. Bur. min., bull. 617, 1963.

Nicolet M. L'helium dans l'atmosphere terrestre. Uccle-Bruxelles, 1957

Oilweek J. Canadian helium to lose present markets in Europe, vol. 16 № 36, 1965.

Oliphant M. L. E., Harteck P., Rutherford E. Transmutation effects observed with heavy hydrogen. Roy. soc. Lond. pr., ser A, 144, 692, 1934.

Paneth F., Gunther P. Z. phys. chem. A. 173, 401, 1935.

Paneth F., Reasbeck P., Mayne K. Geochim. cosmochim., acta, 2, 300, 1952.

Patterson C., Tulton I. R., Inghram M. Concentration of uranium and lead and the isotopic composition of lead in meteoritic material. Phys. rev., 92, 1234, 1953.

Phillips plant a helium plant in Kansas. Oil a. gas j., vol. 63, № 17, 1965.

Piccioletto E. E. Distribution de la radioactivite dans les roches eruptives. Bull. Soc. Belg. geol. paleontol. et hydrol., 59, 170, 1950.

Pierce A. P., Gott G. B., Mytton J. W. Uranium and helium in the Panhandle gas field Texas and adjacent areas. Geol. Surv. profess. pap. 454-G. Wash., 1964.

Poborski J., Zielinski E. Koncentracja helu w gasonosnych partiach zloz solnych na Kujawach. Przegl. geol., 7, № 9, 1959.

Present R. D., Bethune A. I. Phys. rev., 75, 1050, 1949.

Pylant H. S. Helium its status to day and its promise for tomorrow. Oil a. gas j., vol. 60, № 6, 1962.

Rakestraw N., Herrik C., Urey W. J. Amer. chem. soc., 61, 2806, 1939.

Rankama K. Progress in isotope geology. Intersci. publ. N.-Y. — Lond., 1963.

Rankama K., Sahama T. H. G. Geochemistry. Chicago, 1950.

Ray N. Appl. chem., IV, 21, 82, 1954.

Richardson A. S., Nelson H. V. Supplies and uses of helium. Canadian min. j., vol. 83, № 4, 1962.

Sai T., Hugness T. R. J. phys. chem., 36, 2595, 1932.

Sawatzky H. B., Agarwal R. G., Wilson W. Helium prospects in S. W. Sask. Oil in Canada, 12, № 23, 1960.

Skerl C. The cosmic origin of metallogenetic provinces. Econ. geol., 52, 3, 1957.

Smith I. E. The Cretaceous limestone producing areas of the Mara and Maracaibo District-Venezuela. Proc. Third. World petrol. congr., sect. 1, 56-72 (1951).

Strutt R. I. Proc. Roy. soc., 80, 572, 1908; 81, 272, 1908; 83, 298, 1910; 84, 194, 1910.

Suess H. E., Urey H. G. Revs. mod. phys., 28, 53, 1956.

Szelenyi T. Zur Geochemie des heliums. Évkönyke a magyar. Királyi földtani intézet. Bd 35, № 4, 1941.

Taylor R. J. Soc. chem. industr., 48, 369, 1929.

Thomas A., Alba P. Газовая хроматография, 9, М., ГосИНТИ, 1962.

Travers M. W. Zs. phys. chem., 61, 241, 1908.

Turekian K. K. The terrestrial economy of helium and argon. Geochim. cosmochim. acta, vol. 17, № 1/2, 1959.

Turekian K. K., Wedepohl K. H. Distribution of the elements in some major units of the Earth's crust. Bull. Geol. soc. Amer. 72, № 2, 1961.

Unsöld A. Zeitschr., Astrophys., 24, 323, 1948, 21, 1, 1941.

Urey H. C. The planets their origin and development. Lond., 1952.

Urry W. D. J. chem. phys., 4, 40, 1936.

Wheller H. P., Swenarton L. B. Helium: bibliography of technical and scientific literature from its discovery (1868) to january 1947. Bull. 484, Bur. min., 1952.

Wilkins W. Atomic Energy. Res. estable, C/R, 2809, 1959.

Zartman R. E., Wasserburg G. J., Reynolds J. H. Helium, argon and carbon in some natural gases. J. Geophys. res., vol. 66, № 1, 1961.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Глава I. Краткая характеристика изученности геологии гелия . . . . .	5
Глава II. Свойства гелия и методы его аналитического определения . . . . .	12
§ 1. Свойства гелия . . . . .	—
§ 2. Методы аналитического определения гелия . . . . .	28
Глава III. Распространенность гелия и его природные изотопы . . . . .	33
§ 1. Распространенность гелия . . . . .	—
§ 2. Природные изотопы гелия . . . . .	37
Глава IV. Источники, механизм и масштабы накопления гелия . . . . .	43
§ 1. Масштабы генерации гелия в недрах при альфа-излучающем радиоактивном распаде . . . . .	44
§ 2. Масштабы накопления на Земле гелия, не связанного с процессами альфа-распада . . . . .	66
§ 3. Миграция гелия в недрах и его диссипация . . . . .	70
§ 4. Баланс гелия на Земле . . . . .	91
Глава V. Гелиеносность природных газов . . . . .	96
§ 1. Виды естественных проявлений гелия и классификации природных газов по степени их гелиеносности . . . . .	—
§ 2. Гелиеносность природных газов свободных газовых скоплений . . . . .	100
§ 3. Гелиеносность газов, растворенных в подземных водах и нефтях . . . . .	119
§ 4. Гелиеносность газов, выделяемых вулканами, фумаролами и т. п. . . . .	125
§ 5. Гелиеносность газов, свободно выделяющихся из шахт, рудников и соляных копей . . . . .	129
Глава VI. Закономерности распределения гелия в осадочной толще коры Земли . . . . .	135
§ 1. Баланс гелия в седиментационных отложениях . . . . .	—
§ 2. Основные геологические и геохимические закономерности распределения гелия в осадочной толще . . . . .	143
§ 3. Размещение зон регионального гелиенакопления на Земле. Гелиевые геохимические провинции . . . . .	165
Глава VII. Формирование месторождений гелиеносных газов и их классификация . . . . .	175
§ 1. Гелиевый баланс залежей природных газов . . . . .	176
§ 2. Фазовые взаимодействия на границах сред . . . . .	177
§ 3. Условия формирования залежей гелиеносных газов и их классификация . . . . .	183
Глава VIII. Промышленные типы гелиевых месторождений . . . . .	193
§ 1. Промышленные оценочные параметры гелиевых месторождений . . . . .	194
§ 2. Ведущие промышленные типы гелиевых месторождений . . . . .	197
Глава IX. Методы поисков месторождений гелиеносных газов . . . . .	199
§ 1. Поисковые геологические критерии и признаки . . . . .	—
§ 2. Виды и этапы поисковых работ на гелий . . . . .	204
§ 3. Методы поисков гелия . . . . .	205
Глава X. Разведка месторождений гелиеносных газов . . . . .	210
§ 1. Виды запасов гелия и их категории . . . . .	211
§ 2. Подсчет запасов гелия . . . . .	212
Глава XI. Добыча гелия и охрана его ресурсов . . . . .	217
§ 1. Источники и способы промышленного получения гелия . . . . .	—
§ 2. Добыча гелия за рубежом . . . . .	219
§ 3. Охрана ресурсов гелия . . . . .	222
Литература . . . . .	224