

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А. Н. ПАВЛОВ

ШЕЛЬФ КАК ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

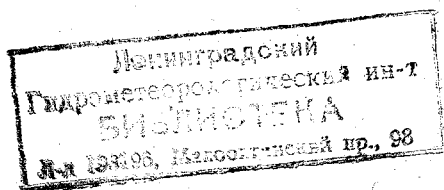
Конспект лекций

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ М. И. КАЛИНИНА

ЛЕНИНГРАД
1980

Одобрено Ученым советом Ленинградского гидрометеорологического института

С системных позиций излагаются современные представления о морфологии и геологическом строении шельфовых областей. Последние рассматриваются как элемент гидросферы Земли, специфику которого определяет его геоструктурное положение.



(С) Ленинградский гидрометеорологический институт, 1980 г.

ТЕМА 1. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ШЕЛЬФОВЫХ ОБЛАСТЕЙ

В фантастической повести Р. Уормсера «Пан Сатирус в космосе» по ходу развития событий возникает необходимость дать юридическое определение человека. Кажется, оно так и не состоялось. Но мы вспомнили о нем не для того, чтобы решать эту, на первый взгляд, странную задачу, а чтобы в необычности требования к установившемуся понятию читатель обостренно почувствовал, что один и тот же объект можно, а в ряде случаев и должно понимать по-разному, истина может быть многоликой. Все зависит от постановки задачи.

Именно так обстоит дело с толкованием понятия шельф. Здесь ситуация усугубляется еще и тем, что разные авторы не только по-разному определяют его, но часто используют и различную терминологию. Приведем лишь некоторые иллюстрации: шельф≡материковая отмель≡континентальный шельф≡континентальная терраса, внутренний шельф≡прибрежная отмель≡прибрежный шельф≡мелководная зона шельфа≡верхняя часть шельфа≡бенч≡стрендфлет. Иногда один и тот же термин обозначает различные объекты. Например, под континентальной террасой понимаются и шельф, и совокупность шельфа с континентальным склоном. А вот из области генетических расхождений: шельфы — это поверхности, сформировавшиеся в субаэральных условиях, и поэтому ряд исследователей включает в состав шельфов часть суши, прилегающей к береговой линии; под шельфами находится кора материкового типа, структура коры под шельфами сложнее материковой, под шельфами может находиться и океаническая кора (острова, шельф Лабрадора, возможно, Каспийского моря) и т. д. За определениями следуют классификации, разумеется, тоже очень разные.

История изучения шельфа сложилась таким образом, что его понятие непрерывно трансформируется, и можно думать, что какое-либо общее определение, удовлетворяющее одновременно географию, геологию, гидрогеологию и т. д., если и будет выработано, то не скоро. Поэтому для общей характеристики этих областей воспользуемся известным морфологическим понятием, утверждающим, что шельф — это затопленные материковые равнины суб-

аэрального генезиса, характеризующиеся средними уклонами $0^{\circ}07-0^{\circ}08$. Внешняя их граница проводится по самому верхнему резкому перегибу линии дна (от приведенных уклонов до $7^{\circ}-15^{\circ}$). Их морфометрические данные обычно оцениваются в пределах условий границы — изобаты 200 м: средняя ширина 65 км, глубина — 130 м, площадь около 26,6 млн. км² [11].

Безупречное определение чего-либо вообще дать трудно, на-верное, правильнее просто объяснить существующие взгляды на предмет. Попробуем именно так и поступить в нашем разговоре о шельфовых областях.

1. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Слово шельф является английским (shelf) и в негеологическом переводе означает полка. В науке о Земле оно вошло как чисто морфологическое понятие, связанное с тем, что области океана, прилегающие к суше, чаще всего представляют собой пологие выровненные поверхности. Правда, в геологической литературе оно используется значительно шире, обозначая еще и обломочную породу, и пласт, и щит, и даже горизонтальную площадку ниже шва у гастропод (брюхоногих и моллюсков).

Положение шельфов на подводной окраине материков и терминологические разночтения хорошо видны на рис. 1.1. Проком-

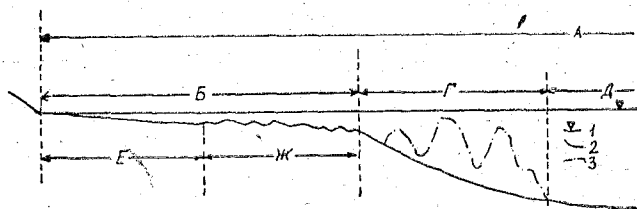


Рис. 1.1. Схема элементов рельефа дна подводной окраины материков (по Н. И. Николаеву [10, с. 6])
1 — уровень моря, 2 — береговой склон и поверхность дна, 3 — поверхность бордерленда. Термины, используемые для обозначения одних и тех же элементов рельефа: А — подводная окраина материков, предконтинент, материковая окраина, континентальная терраса, подводный цоколь континентов; Б — шельф, материковая отмель, континентальный шельф, континентальная терраса; излом профиля на границе между Б и Г — внешний край шельфа, шельфовый край, кромка шельфа; Г — континентальный бордерленд, краевое плато, прогнутый шельф, аваншельф, материковый склон; материковое подножие; Е — внутренний шельф, прибрежная отмель, прибрежный шельф, верхняя часть шельфа, мелководная зона шельфа бенч, стренфлет; Ж — внешний шельф

ментируем его. Внутренней границей шельфа обычно считается береговая линия, отвечающая современному положению уровня моря или океана. Поскольку положение этой линии не постоянно, и она может перемещаться в течение суток до 10—15 км, следует оговорить ее граничный статус. К сожалению, на этот счет в литературе нет каких-либо определенных точек зрения. Вопрос обычно остается открытым и обсуждается приблизительно так: можно считать, что литораль относится к шельфу, так как является одновременно краевой частью суши и моря; если ее исключить из состава шельфа, то, по существу ничего не меняется, поскольку изучать шельф без литорали нельзя. Нетрудно видеть, что такой демократизм относительно определения внутренней границы является чисто внешним и в неявной форме устанавливает эту границу как береговую линию при максимальном приливе. Правда, некоторые авторы, исходя из представлений о субаэральном происхождении поверхности шельфов относят к ним и те приморские низменности, которые находились под уровнем моря в эпоху максимальных трансгрессий. Они, безусловно, правы, но это уже не современный шельф. Таким образом, для того, чтобы вопрос о береговой линии как внутренней границе шельфа сделать более определенным, необходимо объяснить, что мы имеем в виду, когда говорим о современном образовании береговой линии. Здесь тоже нет единого мнения, однако при всем разнообразии точек зрения наиболее обоснованными в настоящее время выглядят следующие три [3]:

1. В результате последней трансгрессии, начавшейся 6—7 тыс. лет назад, уровень океана непрерывно повышается, асимптотически приближаясь к уровню, отвечающему нашим прямым измерениям. Очевидно, что в данном случае под современным уровнем, а значит, и современной внутренней границей шельфа можно понимать положение береговой линии с момента становления океанографии. Вывод несколько смешной, но, если нас интересует хотя бы ориентировочная датировка, он оказывается единственным.

2. Уровень моря достиг измеряемого сегодня (современного) и не менялся в течение последних 3—5 тыс. лет.

3. Уровень моря впервые достиг современного 5—6 тыс. лет назад и позже испытывал лишь небольшие флуктуации.

Нетрудно видеть, что эти три вывода объединяет внутреннее согласие о последнем прекращении трансгрессий, заметно влияющих на положение уровня океана. Отличаются же они лишь взглядами на механизм этого процесса (непрерывный или дискретный).

Внешняя граница шельфа является, пожалуй, наиболее дискуссионной. До относительно недавнего времени за нее принималась изобата 200 м, а по современным представлениям она проводится по сравнительно резкому перегибу поперечного профиля, назы-

ваемому бровкой шельфа. Но это, на первый взгляд, ясное положение оказалось неоднозначным. Дело в том, что во внешней зоне шельфов может встречаться несколько уступов, к тому же, как выяснилось в последние годы, шельф — это не всегда равнинные территории, они пересекаются желобами, каньонами, подводными возвышенностями, т. е. часто имеют сложный рельеф. Поэтому за внешнюю границу принят самый верхний перегиб, расположенный на глубинах не свыше 550 м. Более глубокие и сильно расчлененные участки получили название бордерленда (пограничной полосы). В ряде районов между шельфом и ложем океана существуют глубоководные террасы (по-видимому, остатки более древних шельфов), которые описываются в литературе как краевые плато (например, плато Блейк у юго-восточного побережья США, Иберийское плато и др.). Как видим, переход от шельфа к континентальному склону оказался значительно сложнее, чем предполагали в первой половине нашего века.

В настоящее время принято делить шельф на две зоны: внутренний шельф и внешний (см. рис. 1.1). Если внутренняя зона абразионноаккумулятивного происхождения, она обычно называется прибрежной отмелью. Ширина ее колеблется от десятков метров до сотен километров. Сформировалась она в основном в плейстоцене (до голоцена, т. е. 6—7 тыс. лет назад [3]). Если внутренняя зона сформирована в основном абразией, она называется бенч. Граница между зонами обычно проводится по перегибу дна — бровке отмели.

Существуют различные морфологические схемы шельфов, из которых наиболее популярная принадлежит Ф. Шепарду [12]:

Шельфы областей оледенения. Это наиболее расчлененный тип шельфа, как правило, значительной ширины, с многочисленными котловинами и трогами, глубина которых чаще всего превышает 200 м. Для внешнего края таких шельфов характерны многочисленные банки, покрытые песком и галькой, скалистых выходов на них не обнаружено.

Шельфы с вытянутыми песчаными банками и ложбинами. Расположены у побережий, не подвергавшихся оледенению, имеют характерный выпукло-вогнутый изгиб склона, близкий к профилю равновесия. Их отличительной чертой являются вытянутые песчаные банки и пребни, поднимающиеся на несколько метров над средней поверхностью дна. Они ориентированы параллельно берегу на внутренней части шельфа и параллельно бровке на внешней.

Ровные шельфы высоких широт. Они сильно сглажены, широкие, имеют небольшие глубины, вытянуты вдоль побережий, не подвергавшихся оледенениям.

Шельфы, связанные с действием сильных течений. Они либо выработаны течением (эрозионного происхождения), либо, благо-

даря течению, на них не аккумулируются осадки. Это узкие площадки, обрамляющие берега, их отметки ниже обычных отметок шельфа для данного района, где не действуют течения, поверхность сложена коренными скальными или полускальными породами, иногда покрыта песком и гравием небольшой мощности.

Шельфы, образованные действием сильных течений у входа в заливы. Они встречаются там, где имеются относительно крупные заливы, отделенные от океана узкими проливами. Благодаря воздействию приливно-отливных течений здесь образуются характерные глубокие котловины, по обе стороны от которых часто формируются дюноподобные песчаные тела асимметричной формы.

Шельфы перед дельтами больших рек. Они окаймляют фронтальные участки дельт и характеризуются обширными плоскими террасами, развитыми до глубин порядка 90 м. Эти шельфы почти по всей площади покрыты илстыми отложениями, а у внешнего края песками.

Шельфы тропических морей. Повсеместно, где вода имеет высокую прозрачность, эти шельфы покрыты коралловыми и водорослевыми рифами, которые наибольшее развитие имеют на внешней части шельфа.

Узкие шельфы, обрамленные скалистыми банками. Они приурочены к горным побережьям. Скалистые банки, часто поднимающиеся в виде островов, располагаются на внешнем крае этих шельфов. Осадки, заполняющие центральные области, имеют значительные мощности.

Существуют и более простые схемы. Например, О. К. Леонтьев и Д. Е. Гершанович [10] делят шельфы на три группы:

Трансгрессивные, представляющие собой аккумулятивные, денудационные или денудационно-аккумулятивные затопленные равнины окраин платформ.

Выработанные — бенчи или педименты, преобразованные в бенчи, окраин молодых горных сооружений, островных дуг и океанических островов.

Аккумулятивно-дельтовые — по существу, переработанные конусы выноса рек.

Однако ни одна из известных нам схем не может быть названа классификацией, так как, с одной стороны, в них отсутствуют единые принципы членения, а с другой — они (даже самые детальные) не охватывают всего разнообразия шельфов.

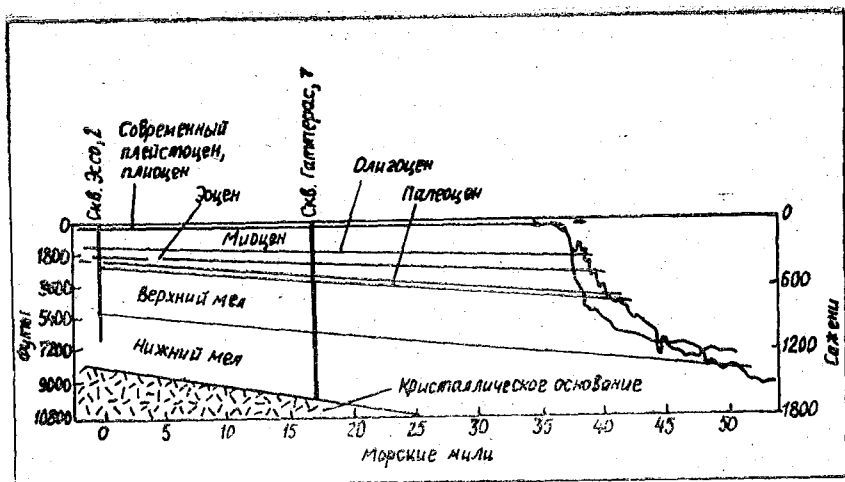
2. ГЕОСТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ

В настоящее время принято различать два тектонических, а значит и геоструктурных, типа окраин континентов: атлантический и тихоокеанский. Поскольку шельфы являются элементами этих окраин, то такая же тахеонетрия распространяется и на них.



Рис. 1.2. Иллюстрация шельфов атлантического типа [1]
а. Срезание домезозойских структур на участке шельфа Западной Европы

Отложения: 1 — неогеновые и палеогеновые нерасчлененные; 2 — меловые; 3 — юрские; 4 — триасовые; 5 — каменноугольные; 6 — каменноугольные и девонские нерасчлененные; 7 — силурийские и ордовикские нерасчлененные; 8 — силурийские, ордовикские и кембрийские нерасчлененные; 9 — докембрийские; 10 — простираение магнитных аномалий в проливе Ла-Манш; 11 — край шельфа.



б. Разрез шельфа Северной Америки у мыса Гаттераса (по Хейзену, Тарп и Юингу)

Атлантический тип. Эти шельфы начали формироваться в мезозое на территориях, находящихся на платформенной стадии развития. Именно поэтому их боковые границы (береговая линия и бровка) срезают домезозойские структуры, являющиеся как бы фундаментом для мезозойских и более молодых отложений (рис. 1.2). Это широкие шельфы, ширина их достигает многих сот километров, они преобладают вокруг Атлантического и Индийского океанов. В Северном Ледовитом океане других типов шельфов вообще не установлено. Вулканизм для этих территорий не характерен.

Мезозойские и кайнозойские осадки (мелкого моря и континентальные) накапливались здесь в условиях компенсационного прогибания. При этом внешний край шельфа чаще всего опускался быстрее, мощность отложений в этой зоне является максимальной. В различных районах начало опускания датируется по-разному. Самое раннее время приходится на юрский период, но наиболее частые датировки относятся к раннему мелу. Опускание внешнего края, как правило, достигает 2—3 км.

Краевые плато обычно относятся к окраинам атлантического типа. Судя по результатам исследования плато Блейк, эти структуры отделились от шельфа в конце мела — начале эоцена. Об этом говорит смена мелководных отложений верхнего мела глубоководными отложениями эоцена.

Атлантический тип шельфа многие исследователи только и считают шельфом или рассматривают его как истинный, как бы чистый шельф.

Тихоокеанский тип. Этот тип шельфовых структур и их соотношение с материковыми и океаническими структурами значительно сложнее. Здесь находится зона молодых геосинклиналей мезозоя и кайнозоя, в пределах которой на неотектоническом этапе развивается эпигеосинклинальная орогенная зона.

Крупные мезокайнозойские структуры регионального масштаба субпараллельны береговой линии. Структуры же второго и более высоких порядков краем океана срезаны. Их возраст, а значит и время возникновения этого несогласия, датируется и миоценом и даже плейстоценом. Срезание структур обусловлено разломами, дроблением земной коры на блоки, из которых одни опускались, другие оставались в поднятом положении. В результате возникали окраинные моря, такие, как Беренгово, Охотское, Японское и соответствующие островные дуги, получившие в литературе название дуг первого типа. Их характерная особенность состоит в том, что они пережили геосинклинальный этап развития.

С конца мела в этих же областях, но ближе к внешним частям окраин, стали возникать новые крупные разломы, вдоль которых появляются цепочки вулканов, а потом и новые островные дуги, уже второго типа. Большая часть их сформировалась в миоцене и плиоцене. История этих дуг не знала геосинклинального эндогенного режима, их обязательным элементом является глубоко-водный желоб с внешней стороны.

Геосинклинальные режимы, многократное раскалывание земной коры, интенсивный вулканизм на окраинах тихоокеанского типа проявлялись и в другой форме — без островных дуг. Иллюстрацией такого варианта могут служить многие районы Северо- и Южно-Американских Кордильер (Каскадные горы, Южно-Калифорнийский комплекс и др.).

Таким образом, общим для шельфовых областей атлантического и тихоокеанского типов является то, что их возникновение связано с опусканием земной коры, а отличие состоит в характере этого опускания. В первом случае происходило спокойное изгибание коры с малой ролью разломов и без вулканизма, во втором — кора испытывала глубокое раскалывание и глыбовое обрушение, сопровождавшиеся активной магматической деятельностью.

Шельфы тихоокеанского типа узкие, значительно расчленены подводными долинами, каньонами, моложе атлантических шельфов, имеют более сложный структурный объем.

Г. С. Геншиным, В. В. Соловьёвым, Ю. Ф. Чемяковым [10] предложена интересная геоструктурная классификация шельфов (табл. 1.1). Категория 1-го порядка выделена ими на глобальном морфоструктурном уровне, как совокупность подводных мелковод-

Топологическая классификация шельфов по геоструктурным критериям [2]

Категория			
1-го порядка	2-го порядка	3-го порядка	4-го порядка
Шельф	Ортошельф (истинный шельф)	Ортошельф на плитах разного возраста Ортошельф на кристаллических щитах Ортошельф на срединных массивах разного возраста	Ортошельф на антиклизях Ортошельф на синеклизях и т. д.
	Парашельф (близкий к истинному шельфу)	Парашельф в пределах складчатых областей разного возраста (парашельфы каледонид, герцинид и др.)	Парашельф на антиклинориях Парашельф на синклинориях и т. д.
	Гемишельф (полушельф)	Гемишельф в пределах молодых геосинклиналей, островных дуг, океанических островов, их архипелагов и т. д.	Гемишельф на антиклинориях Гемишельф на синклинориях и т. д.

ных равнин, окаймляющих сушу. Категория 2-го порядка учитывает основные типы геоструктурных областей, прошедших такие эндогенные режимы развития, как платформенный, орогенный, геосинклинальный. Более высокие категории (как это видно из таблицы) выделяются на основе более мелких структур, например: плита — щит — срединный массив → антиклизы — синеклизы — вал — уступ и т. д.

3. ПОНЯТИЕ ШЕЛЬФА КАК СИСТЕМЫ

С позиций системного подхода на шельф следует смотреть как на геологическую систему вода ⇌ порода, в которой породы выполняют роль вмещающей среды и контролируют не только формы движения воды, но и изменения ее химического состава. В этом смысле они определяют геометрию системы, свойства которой (не аддитивные) формируются как продукт взаимодействия составляющих элементов. При таком подходе к предмету шельф необходимо понимать как континентальную террасу в описании Ф. Шепарда [13], который объединяет в ней континентальный шельф с континентальным склоном, включая сюда и континентальный бордерленд и краевые плато.

Поиски геологического определения шельфа напоминают историю развития представлений о речных террасах. По С. С. Шульцу, они были полыми и разновозрастными, не имели геологического объема и представляли собой поверхности, заканчивающиеся на перегибе, теперь называемом бровкой террасы. Неправда ли, схожие ситуации? Действительно, если начинать с морфологии (а шельф — это исторически понятие морфологическое), то выделение пологих и волнистых равнин в области перехода от суши к морю является естественным актом. Но в таком понимании, кроме как о поверхности, говорить больше не о чем. Если же встает вопрос о том, что эта поверхность разделяет, то на нее следует смотреть как на границу между прилегающими к суше областями океана и литосферы. Поэтому при чисто морфологическом понимании шельфов, на котором настаивают некоторые исследователи, геология и гидрогеология их в обычном понимании становятся беспредметными. Конечно, можно изучать геологические и гидрогеологические условия этой поверхности (и без такого изучения, кстати, не обойтись), но оно не исчерпывает предмета. Поэтому для геологов и гидрогеологов понятие шельфа не может быть не объемным, а следовательно, оно не может не совпадать с понятием континентальной террасы в понимании Ф. Шепарда.

Итак, мы будем рассматривать определенный объем горных пород и вод, находящихся в определенных условиях. Этот объем представляет собой систему, потому что породы и воды, которые его заполняют, взаимодействуют. Именно их взаимодействие и

формирует континентальную террасу как нечто целостное, по структуризации отличающееся от других геологических объектов. Но взаимодействие вода $\rightleftharpoons$ порода существует и в других областях земной коры и литосферы. * Поэтому этот принцип без каких-либо дополнений не достаточен для нашей задачи. Он необходим лишь для того, чтобы понять объемность исследования и подчеркнуть, что употребление сочетаний «геология или гидрогеология шельфовых областей» опирается не на морфологическое, а на геологическое толкование шельфа. Если говорить строго, то система вода $\rightleftharpoons$ порода является чрезвычайно обширной и емкой, по существу, что понятие охватывает всю подземную часть гидросферы, т. е. тот объем твердой Земли, где можно предполагать взаимодействие воды с породой. Таким образом, нужны какие-то дополнительные критерии, которые бы позволили увидеть и отличить в общеземной системе вода $\rightleftharpoons$ порода подсистему шельфовую. В общем виде это дополнение можно сформулировать как особые условия взаимодействия, приводящие к возникновению особой структуризации внутри системы. Это верно, но тоже недостаточно, поскольку касается выделения, вероятно, любой подсистемы. Необходимо особые условия конкретизировать. В настоящее время, по крайней мере в первом приближении, для шельфа можно обсуждать три момента: состав и структуру вмещающих пород, особенности геофизических полей и условия на границах. Правда, третье условие, касающееся границ, является определенным лишь отчасти. Дело в том, что перед тем как говорить об условиях на границах, необходимо эти границы как-то установить, и здесь начинает работать обратная связь, поскольку границы проводятся на основании какой-то меры сходства, и в зависимости от того, какой критерий мы выберем, граница будет той или иной и пространственно может существенно смещаться.

Представления о составе и структуре пород шельфа и прилегающей суши можно, пожалуй, свести к двум точкам зрения:

1. Полная геологическая идентичность этих областей или, если выражаться осторожнее, существование принципиально не отличимых различий.

2. Шельфы построены сложнее.

Как отнестись к этим взглядам? Не хотелось бы категоричности, тем более что в данном вопросе она долго еще будет неуместной и даже вредной. Попробуем порассуждать.

Если принять первую точку зрения, то само собой отпадает и первое, дополнительное условие выделения шельфовой подсистемы, а значит, уменьшаются отличия ее от подсистемы континентальной, петрология и структура среды под шельфом перестают быть спе-

* Термины даются в трактовке плитной тектоники.

цифичными. Надо сказать, что на этом основаны некоторые геоструктурные классификации шельфов.

Вторая точка зрения для нас интересней, но, приняв ее, следует показать, в чем же заключается, в чем состоит петрологическая и структурная специфика шельфов. Известные доводы против таких взглядов кажутся нам мало убедительными, поскольку строятся в основном на несогласии оппонентов с возможностью перерождения континентальной коры в океаническую (о чем будто бы вторая точка зрения свидетельствует) и на утверждении, что нельзя говорить о большей сложности менее изученных объектов по отношению к более изученным. Конечно, не следует настаивать, но допустить, ожидать большую сложность можно и основанием для этого служит не столько степень изученности объекта, сколько его отношение к целому как части. Шельфы входят в состав переходной зоны, по существу являясь частью граничной области между двумя типами земной коры. А граничные области всегда сложнее объектов, которые они разделяют, поскольку несут в себе свойства и черты каждого из них. Это общеизвестный факт и он, безусловно, достаточен, чтобы ожидать под шельфами усложнение геологического строения. Другой вопрос, где и когда оно различимо. Кроме того, в пользу второй точки зрения говорит и аномально высокая в сравнении с прилегающей сушей тектоническая активность шельфовых территорий, поскольку сегодня ни у кого не вызывает сомнений, что затопление окраин суши имеет не только эвстатические, но и тектонические причины.

Вообще говоря, не исключена и третья точка зрения, что геологическое строение одних, возможно, выработанных шельфов * идентично прилегающей суше, а других (трансгрессивных и аккумулятивно-дельтовых *) — заметно отличается от нее. Если обратиться к более детальной классификации континентальных террас (рис. 1.3, [13]), такой взгляд покажется вполне убедительным. Прокомментируем эти схемы:

а) континентальная терраса ограничена сбросовыми уступами, ее поверхность подвержена абразии. Обломочный материал, появляющийся при этом, может накапливаться на континентальном склоне, если он достаточно пологий. Когда его крутизна превышает угол естественного откоса, осадки начинают сползать и накапливаться у подошвы террасы;

б) континентальная терраса интенсивно опускалась и на поверхности возникла довольно мощная толща осадков;

в) континентальная терраса с внутренней стороны является абразионной, а с внешней представляет собой выдвинутый в результате интенсивной аккумуляции континентальный склон;

г) континентальная терраса возникла как суммарный резуль-

* Типы шельфов названы по О. К. Леонтьеву и Д. Е. Гершановичу [10].

тат активной аккумуляции осадков на поверхности самого шельфа при его интенсивном опускании и аккумулятивного нарастания склона;

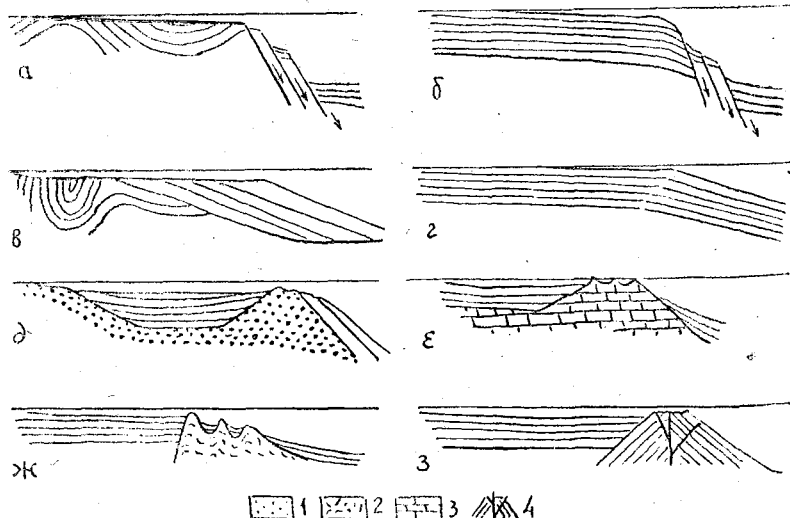


Рис. 1.3. Основные типы континентальных террас [13]:
1 — породы фундамента; 2 — соляные купола; 3 — коралловый риф; 4 — вулканическая постройка
а, б, в, г, д, е, ж, з — типы континентальных террас (описание см. в тексте)

д) континентальная терраса, внешний край которой ограничен тектоническим барьером (по К. Эмери — краевые гряды). Сам шельф образовался в результате заполнения осадками котловины между этим барьером и берегом;

е) континентальная терраса, ограниченная рифовым барьером. Ф. Шепард, однако подчеркивает [13], что за внешним краем барьера, склон чаще всего имеет сбросовое происхождение;

ж) континентальная терраса, ограниченная диапировым барьером, связанным с солянокупольной или грязевой тектоникой;

з) континентальная терраса, ограниченная барьером вулканического происхождения.

Рассматривая схемы Ф. Шепарда (а они основаны на весьма обширном фактическом материале), становится ясным, что большая литологоструктурная сложность шельфов может быть констатирована и без привлечения идеи базификации коры. Достаточно того, что у всех шельфов, кроме выработанных (по Ф. Ше-

парду, абразионных), на континентальных структурах залегает мощная толща молодых новообразований вплоть до илов, т. е. пород, которых на прилегающей суше нет. А это значит, что здесь активно идут элизионные процессы и разнообразен диагенез.

Как правило, сложному геологическому строению присущи и сложные геофизические поля. Поэтому позиция, которую мы занимаем по первому дополнительному условию, в известной мере предопределяет и отношение ко второму условию. Правда, особенности структуры геофизических полей, особенно таких, как гравитационного, магнитного и теплового, определяются здесь не столько строением верхней части разреза, сколько нижними слоями коры. Но даже если в вопросах геологии и гидрогеологии мы будем рассматривать в основном осадочный чехол, то и тогда напряженность полей, градиенты их потенциалов не перестанут влиять на характер взаимодействия главных элементов системы вода⇌порода. Некоторые обобщения по характеру геофизических полей даны С. Б. Слевичем [11]. У береговой линии гравитационные аномалии близки к нулю. Это значит, что вдоль внешней границы шельфа строение земной коры близко к эталонному разрезу. Назвав эту ситуацию нормой, можно принять, что она отвечает некоторому гравитационному равновесию (мы еще вернемся к этому чрезвычайно любопытному факту). К внешнему краю шельфа аномалии возрастают, достигая +100 Мгал, на континентальном склоне они увеличиваются уже до +300. При этом изометры часто почти параллельны изобатам. Край шельфа коррелирует с аномалиями магнитного поля и теплового потока.

В общем, создается впечатление, что в земной гидрогеологической системе вода⇌порода континентальная терраса имеет свои отличительные признаки, а значит может быть выделена в самостоятельную подсистему.

ТЕМА 2. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ГРАНИЦЫ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ТЕРРАСЫ

1. ГРАНИЦА ОКЕАН — ЛИТОСФЕРА

Это единственная граница, положение которой более или менее очевидно. Ее можно разделить на поверхности двух категорий: поверхность, которую принято называть собственно шельфом, и континентальный склон.

В геологической истории земной поверхности шельфы занимают особое место. Являясь частью континентов, они находятся под уровнем океана, здесь образовалось почти 90% известных нам осадочных пород, периодически эти поверхности становятся вновь сушей, потом сызнова затопляются. Одним словом, на них ведется постоянная борьба между сушей и океаном. И есть за

что, так как береговая линия — это уникальное явление: здесь взаимодействуют три главные фазы земного вещества — воздух, вода и минеральное вещество.

Если посмотреть на известную всем гипсографическую кривую (рис. 2.1), то легко убедиться, что граница литосферы и поверхность океана делит координатную плоскость рисунка на три части. Этот рисунок внешне напоминает диаграммы фазовых равновесий, при этом точка А (представляющая собой след береговой линии) фиксирует равноправное сосуществование трех фаз. Похоже, что в гидросфере таких точек больше нет. Напомним, что точка А характеризуется и практически нулевыми значениями аномалий

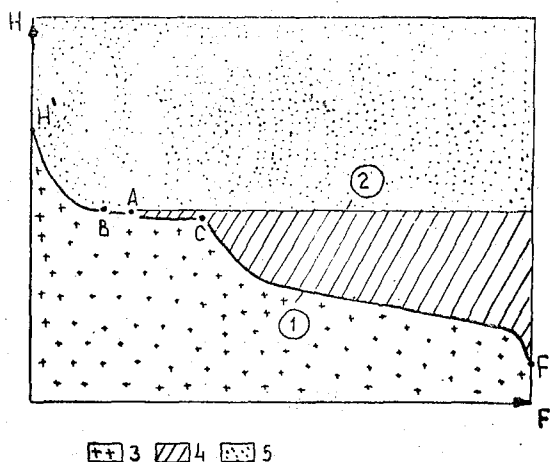


Рис. 2.1. Гипсографическая кривая:
1 — гипсографическая кривая $H(F)$; 2 — уровень мирового океана; 3 — литосфера; 4 — океанические водные массы; 5 — атмосфера; А — береговая линия; В — береговая линия при максимальном поднятии уровня океана (условно); С — бровка шельфа

поля силы тяжести. Можно думать, что ее положение возникает не просто как продукт взаимодействия трех фаз, но само взаимодействие предопределено глубинными процессами. Возможно, что эталонному сфероиду поля тяготения (как модели) случайно или не случайно как бы соответствует реальный прототип — кора под береговой линией. Мы сказали «как бы», потому что коры такой скорей всего нет, но гравитационный эффект от прилегающих к этой линии областей коры дает эталонные значения измеряемой напряженности.

В отличие от фазовых диаграмм, на нашем рисунке величины H и F являются параметрами не состояния, а пространства. Однако характер кривой $H'F'$ в известной мере этим пространством контролируется, поскольку фазы, заполняющие его, взаимодействуют. Мы знаем, что начальная форма кривой $H'F'$ (как поверхность литосферы) создается эндогенными процессами, а дальнейшее ее изменение определяется экзогенными факторами. Вот тут-то и возникает различие в характере воздействия пространства на кривую $H'F'$. В пределах суши кривая находится под влиянием атмосферного пространства, в пределах океана — под влиянием масс воды. И только точка A принадлежит сразу трем фазам. Но ее особенность заключается не только в этом, для нее свойственна еще и способность в геологическом времени перемещаться по кривой $H'F'$. Благодаря такой особенности свойством одновременной трехфазности обладает множество точек, находящихся в пределах отрезка BC . Нетрудно видеть, что одна его часть AC составляет собственно шельф, а другая BA — является бывшим шельфом.

Таким образом, в историческом плане шельфы можно рассматривать как совокупность точек своеобразного фазового равновесия. Все, что происходит на шельфе, контролируется взаимодействием атмосферы, океана и суши. В результате граница океан — литосфера в пределах шельфа имеет целый ряд как типично континентальных, так и типично атмосферных черт. Применительно к задачам гидрогеологии данное обстоятельство можно расшифровать следующим образом:

1. В пределах континента формируются определенные гидрогеологические условия (водоносный горизонт или комплекс, с присущими им полями давления, температуры, химическим составом, областями питания и разгрузки).

2. Эти условия генерируют совершенно конкретный гидрогеологический сигнал на поверхности литосферы в области шельфа.

3. Под действием водных масс шельфа этот сигнал существенно искажается (меняется его химический облик, температура, динамические характеристики).

4. Водные массы шельфа, имея безусловные черты вод открытого океана, перемещаются не сами по себе. Их стратификация и структура определяются атмосферными процессами.

Таким образом, очевидно, что если гидрогеологический сигнал на шельфе можно представить как некоторый параметрический образ, то следует иметь в виду, что по сравнению с чисто континентальными условиями число параметров, описывающих и формирующих образ, не только возрастает количественно, но усложняется и качественно.

Те окна фильтрации, которые в основном контролируют внешний вид гидрогеологического поля на шельфе, могут быть чрезвы-

чайно мобильны, меняя свое положение буквально от шторма к шторму. Конечно, их структурная геологическая основа так быстро не меняется, но меняются наносы, как правило, перекрывающие их (по типу осадков, по их мощности, форме, слоистости и т. д.). Поэтому говорить о гидрогеологии шельфов, не рассматривая вопросов литодинамики, просто нельзя. На гидрогеологическую ситуацию в области шельфа (и прилегающей суши) большое влияние оказывают приливы и отливы, штормы, периодические течения. Все эти явления надо не только учитывать при создании гидрогеологии шельфовых областей, но и найти им место в моделях, определить форму параметризации, включить их в гидрогеологические системы.

Геологическое строение поверхности шельфов и литодинамика наносов на ней обобщены во многих публикациях. По существу, они и определяют гидрогеологический облик этой пограничной поверхности, который может быть охарактеризован фильтрационными свойствами пород верхней части разреза, химией и температурой придонных слоев морской воды, особенностями иловых вод. В целом можно сказать, что общая геологическая обстановка в пределах шельфов свидетельствует о возможности их активного гидрогеологического функционирования. Здесь можно ожидать как разгрузку подземных вод, так и проникновение морских вод в пределы водоносных горизонтов и комплексов.

Континентальные склоны как гидрогеологическая граница изучены значительно хуже шельфов. Однако для общей характеристики информации вообще поворя достаточно. Мы знаем, что около 60% донных осадков здесь представлены алевритовыми и глинистыми илами, около 25% — песком, обнажения коренных пород и гравий занимают приблизительно 10% площади, на остальной территории находятся ракушечники и карбонатные илы. Морфология этих поверхностей значительно сложнее шельфовых. Достаточно обратиться к литературе по бордерлендам, аккумулятивным шлейфам континентальных подножий, краевым плато, каньонам. Но главное отличие этой части границы от шельфовой заключается в том, что континентальный склон — это уступ, который срезает все шельфовые структуры. Если в пределах шельфа слои осадочных пород (по крайней мере образовавшихся после опускания этих территорий) практически параллельны морскому дну, то по отношению к поверхности уступа континентальной террасы они залегают с угловым несогласием. Выражаясь гидрогеологическим языком, можно сказать, что водоносные горизонты на уступе террасы выклиниваются.

Иными словами, если бы от нас потребовали в пределах континентальной террасы произвести гидрогеологическую типизацию границы океан — литосфера, то первое, что мы могли бы уверенно сделать — это разделить ее на две части (шельф и склон), исходя

не столько из морфологических, сколько из структурных соображений. Даже сказанного достаточно, чтобы понять, что граница в пределах уступа намного сложнее границы в пределах шельфа и, вероятно, значительно активнее. Представьте себе срез разнообразных пород, многочисленные контакты и все это перекрыто плащом молодых осадочных, а в ряде случаев и магматогенных образований, разбито сложной системой сбросов, рассечено каньонами, перемежается с краевыми плато, окаймляется аккумулятивным шлейфом и т. д.

Так обстоит дело с верхней границей объекта наших исследований. Она оказалась внешней для системы вода⇌порода, а потому пространственно и физически легко определяемой. Нижняя граница является внутренней, и ее положение сразу перестает быть очевидным. Система вода⇌порода существует не только в объеме континентальной террасы, а значительно глубже. К ней можно причислить кору и литосферу, астеносферу и, возможно, подастеносферные слои. Где же заканчивается наша подсистема?

2. НИЖНЯЯ ГРАНИЦА

Ко всякой внутрисистемной границе может быть предъявлено по крайней мере два требования: во-первых, она должна очерчивать область какой-то специфической структуризации и, во-вторых, должна быть определяемой современными методами. Иными словами, не достаточно сформулировать принцип членения целого, нужно еще показать как это деление осуществить. Например, за нижнюю границу литосферных плит принимается изотерма, соответствующая солидусу, а физический статус литосферы основывается на реологических характеристиках. Положение же солидуса может быть определено различными методами — по тепловому полю, сейсмическими измерениями, исследованием упругих деформаций плит. Разумеется, такие оценки оказываются приблизительными и неоднозначными, но они позволяют от идей перейти к их реализации.

В региональной гидрогеологии основным принципом выделения водоносных горизонтов и комплексов является петролого-структурный, отражающий как микро-, мезо-, так макроструктуризацию подсистем. Безусловно, что пористые среды определяют иной уровень внутренней организации, чем трещиноватые и карстовые, в магматических породах взаимодействие воды со средой отличается от взаимодействия в осадочных толщах и т. д. Этот уровень организации можно назвать мезоструктуризацией. Очевидно, что она влияет и на микроструктуризацию, т. е. взаимодействие на молекулярном и ионном уровне. Складчатость, ее характер, интенсивность, тип определяют макроструктуризацию подсистем вода⇌порода. Петролого-структурный принцип в гидрогеологии хорошо верифицируется и выдержал проверку в теории и практи-

ке. По-видимому, его можно применить и для установления нижней гидрогеологической границы континентальной террасы.

Начнем с окраин материков атлантического типа. Известно, что их отличает платформенный режим развития, сформировавшийся повсеместно к мезозойскому времени. Все домезозойские структуры срезаются склоном континентальной террасы и являются прямым продолжением, внешней частью материковых тектонических конструкций. Иными словами, эти структуры образовались до возникновения современных шельфов. Можно считать, что к этому моменту в домезозойских образованиях уже сложился некий материковый тип структуризации вода⇌порода. Скорее всего он относился к платформенному образцу, но, главное, что он был дошельфовым. В мезозое окраины материков начинают опускаться. В различных районах датировки этого события, разумеется, не совпадают, на одних участках опускание возникло раньше, на других позже, но во всех случаях оно фиксируется после палеозоя. Его геологические следы обнаруживаются в виде размытой поверхности домезозойского фундамента, на которой спокойно залегают мезозойские осадки. Принципиальная схема соотношения дошельфовых* и современных шельфовых структур показана на

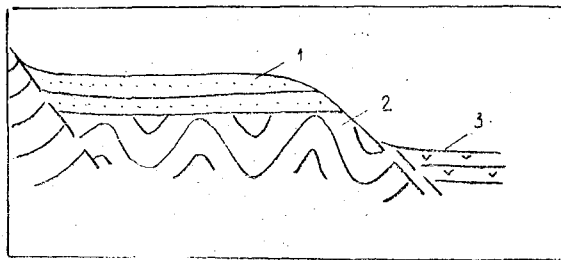


Рис. 2.2. Иллюстрация гидрогеологических границ континентальной террасы
Типы структуризации системы вода⇌порода:
1 — шельфовая, 2 — дошельфовая, 3 — океаническая

рис. 2.2. На окраинах тихоокеанского типа выделить шельфовую подсистему вода⇌порода, по-видимому, трудней. Однако известно, что и здесь начало затопления окраин датируется мезозоем и поверхность размыта $MZ/до\ MZ$ фиксируется.

Вероятно, эту поверхность и следует принимать за нижнюю гидрогеологическую границу континентальных террас. Она отделяет чисто шельфовую структуризацию системы от дошельфовой

* Имеется в виду современный шельф.

и может быть прослежена как геологическими, так и геофизическими методами.

3. НАИБОЛЕЕ ОБЩИЕ СВОЙСТВА ГРАНИЦ

Мы часто сетуем на слабую гидрогеологическую изученность тех или иных территорий на суше, а изученность шельфовых областей и вовсе ничтожна, не говоря уже о том, что многие данные по буровым скважинам и геологическим съемкам не опубликованы и мало доступны для широкого круга специалистов. При таком положении дела задача написать гидрогеологию шельфовых областей даже в форме введения выглядит весьма трудной, больше того, ее можно было бы даже назвать невыполнимой, если предполагать традиционный для геологии путь решения, при котором теоретические выводы являются результатом логических умозаключений на основе натурных данных. Такие построения, по существу, представляют собою аксиомы индукции, поскольку возникают в процессе как бы подстановки всех известных сведений в очевидную или интуитивно выбранную форму.

Здесь мы попытаемся сформулировать наиболее общие принципы гидрогеологического строения шельфовых областей, опираясь на нетрадиционный вариант гипотетико-дедуктивных построений, в основе которых лежит теоретический объект, обладающий некоторым существующим до эмпирической интерпретации смыслом. Небольшой объем гидрогеологической информации по шельфовым областям не позволяет рассчитывать на индуктивное постулирование какой-либо «чисто шельфовой» идеи. Использование существующих «континентальных» аксиом, таких как зональность, гидрогеологическая структура и другие, не создает надежных предпосылок для верификации и фальсификации возможных дедуктивных схем. В этих условиях нужна какая-то идея высокой степени общности, которая бы стояла над «континентальным» и «океаническим» мышлением. Наиболее целесообразно такие идеи искать среди представлений, касающихся строения гидросферы как геологической системы, поскольку шельф является частью одной из ее составляющих — системы вода $\rightleftharpoons$ порода.

Однако выбор такой «надшельфовой» идеи в качестве постулата для построения объективной гидрогеологической концепции шельфовых областей является актом хотя и необходимым, но недостаточным. Следует в будущем выработать строгую, отвечающую основным законам природы систему правил, которая бы позволила построить вполне научную дедуктивную схему, отвечающую поставленной задаче.

Пока же обратимся к наиболее очевидным и относительно хорошо изученным внутренним границам гидросферы, чтобы, отыскав для них общее в строении и свойствах, постулировать это

общее на все границы гидросферы, а значит и на гидрогеологические границы континентальных террас.

Океан — атмосфера

Из всех границ гидросферы эта является, пожалуй, наиболее изученной. Ее исследованием, экспериментальным и теоретическим, на протяжении многих десятилетий занимаются океанологи и метеорологи. Имеется огромное количество публикаций по различным вопросам ее строения и функционирования. Мы не будем здесь заниматься обзором и анализом всего этого материала, а лишь остановимся на тех представлениях, которые для нас выглядят наиболее информативными. *

Данные по водному балансу Мирового океана показывают довольно строгую дифференцированность среднегодовой границы океан — атмосфера по суммарному эффекту влагообмена. Причем можно говорить о дифференцированности разных порядков. Для всего океана средняя граница открыта как бы снизу вверх, т. е. она только пропускает океаническую воду в атмосферу. Точно так же работает средняя граница в океанах южного полушария. Однако в северном она открыта в противоположную сторону — сверху вниз, пропуская только атмосферную влагу. На этом фоне можно выделить более детальную дифференциацию. Разумеется, что если от средних годовых характеристик влагообмена перейти к среднемесячным, декадным и суточным, то с каждым таким актом мы будем усложнять вид границы, которая приобретает как бы мерцающий характер, создающий впечатление хаоса и неуправляемости. Однако, если учесть частоту этих мерцаний, их знак и координаты, то в кажущемся хаосе событий мы увидим пространственную и временную упорядоченность. Иными словами, некоторая большая статистическая дыра в границе складывается из частого появления мелких, но многочисленных разрывов. Попробуем разобраться, чем же обусловлены эти разрывы, какие механизмы управляют их возникновением и залечиванием.

Миграция влаги через границу океан — атмосфера связана в основном с теплообменом, физический механизм которого описан в работах В. В. Шулейкина рассматривает как работу тепловых машин первого, второго и пятого родов [14, 15]. Машины первого рода являются наиболее крупными. В качестве нагревателя в них работают тропические пояса Земли с положительным бюджетом тепла, а в качестве холодильника — высокоширотные области, в которых тепловой бюджет отрицательный. Термобарические колебания и соответствующий им массоперенос воздуха и воды имеют здесь

* Информация — сведения, необходимые для решения задачи. Шум — сведения, не нужные для решения задачи. Дезинформация — сведения, делающие задачу некорректной (перепределенной).

субмеридиональное распространение. Машины второго рода — это уже механизм регионального порядка. В холодное время года нагревателем в них служат наиболее теплые области океана, а холодильником — материки. В теплое время года ситуация меняется на обратную. Исключением являются лишь Антарктида и Гренландия, которые из-за мощного материкового оледенения выполняют функции холодильника круглый год. Работа машин второго рода в значительной мере определяет муссонную циркуляцию, при этом подстилающая поверхность воздействует на нижний слой атмосферы мощностью до 4—5 км, а тепломассоперенос и распространение барических волн характеризуются субширотным направлением.

Заметим, что тепловые машины В. В. Шулейкина, по существу, характеризуют различные уровни структуризации гидрометеорологических потоков, причем, чем выше уровень механической структуризации, тем интенсивнее тепло- и массообмен, тем более четко выражен дырчатый характер силового и теплового взаимодействия.

Анализируя действие тепловых машин второго рода, В. В. Шулейкин разработал принципиальные основы термобарических сейш [14]. Если взглянуть на сейшевое поле как на продукт граничных процессов, то очаги перегрева над океаном можно принять за региональные дырки, через которые океаническая влага наиболее активно проникает в атмосферу, а очаги недогрева — за дырки, открытые в противоположном направлении.

Появление сейш создает термобарическую волну, период которой, согласно теории и наблюдениям, определяется линейными размерами сейшевого поля. Скорость этой волны, вообще говоря, может существенно отличаться от скорости потока воздуха и влаги, либо практически совпадать с ней. Поток, генерируемый сейшевым полем, в известной мере можно представить как зональный,двигающийся по замкнутому кругу (приблизительно вдоль параллели) и периодически проходящий то над нагревателем, то над холодильником. В результате происходит самовозбуждение и как бы резонансное раскачивание термобарической волны с нарастанием амплитуд колебаний снизу вверх. Сейшевые дырки на границе океан — атмосфера не только обеспечивают региональное проникновение одной реологической области в другую, но при определенных условиях еще и способствуют активному горизонтальному перемещиванию.

Сами сейшевые поля испытывают сложное вращательное движение, особенно интенсивное при перестройке на противоположный знак. Это вращение вызвано кориолисовой силой, но, в отличие от маятника Фуко, направлено в северном полушарии против, а в южном — по часовой стрелке, что, по мнению В. В. Шулейки-

на, обусловлено значительным превышением периода сейшевых колебаний над периодом вращения Земли.

Мы привели лишь принципиальные положения из теории сейш, поскольку более детальное описание читатель найдет в работах В. В. Шулейкина, специально посвященных этому вопросу. Нашей же целью было лишь показать, что тепловые машины второго рода генерируют на границе двух реологических сред колебательные процессы переменного знака, являющиеся причиной появления региональных разрывов границы океан — атмосфера.

Теперь остановимся на работе машины пятого рода, в которой нагревателем являются особенно теплые участки океана, а холодильником — все окружающее их пространство. Это тропические ураганы. Средняя ширина их достигает несколько сотен, а высота 6—15 км. Обширные сведения по ним и библиография приведены в книге академика Д. В. Наливкина [7], а описание ураганов как тепловой машины рассматривается в работах акад. В. В. Шулейкина [15].

Теоретический анализ физических полей урагана позволил сделать В. В. Шулейкину ряд важных выводов:

1) вертикальная составляющая скорости ветра приблизительно на два порядка меньше радиальной;

2) восходящие токи воздуха наблюдаются только в пределах примерно первой трети радиуса внешней границы урагана. На остальной площади происходит нисходящее движение;

3) область восходящих потоков представляет из себя очаг тепла, который питает ураган энергией;

4) основной вклад в энергию ядра урагана вносит конденсация водяных паров, поднимающихся в восходящем потоке;

5) для возникновения и развития урагана необходимо, чтобы температура, гарантирующая его тепловой режим, сохранялась не только на поверхности океана, но и на достаточной глубине (вероятно, до нескольких десятков метров).

Тепловая машина пятого рода производит колоссальной интенсивности водообмен между океаном и атмосферой. Она засасывает почти до тропопавзы огромные массы водяного пара, суточный расход которого, судя по интенсивности сопровождающих ураган ливней, близок или в несколько раз превышает годовую норму осадков для средних широт. Нетрудно видеть, что тропические ураганы это тоже своего рода дырки, возникающие на границе океан — атмосфера. В их образовании есть своя периодичность, пространственная приуроченность и физическая индивидуальность. Как и сейши, они определяют разрыв границы, но в более кратковременный и резкий. В то же время по площади развития, длительности существования, энергетической эффективности тропические ураганы можно отнести к категории

макроразрывов, каждый из которых, являясь региональным проявлением, создает как бы планетарный резонанс.

Теперь рассмотрим разрывы более высоких порядков, которые на общепланетарном фоне можно назвать микроразрывами. Их возникновение связано с так называемой холодной пленкой океана, выполняющей, по-видимому, важнейшие функции в режиме верхнего океанического слоя. По различным показателям толщина этой пленки оценивается от 10—20 мкм до 1—2 см (рис. 2.3). Она является причиной очень высоких пограничных градиентов температуры, достигающих 2—5°C на 1 см, резкого изменения коэффициентов обмена (от молекулярных до турбулентных значений) и определяет постоянную гидродинамическую неустойчивость верхнего слоя, следствием которой может быть микрокон-

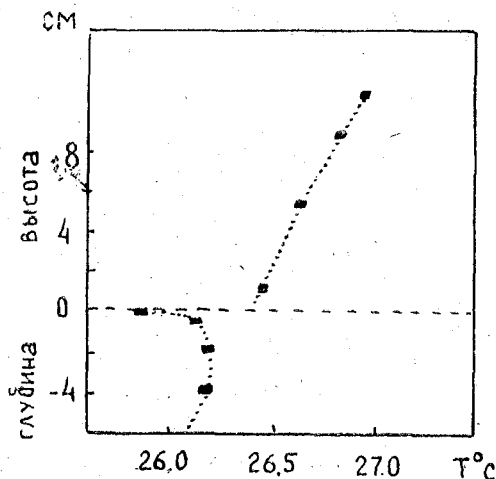


Рис. 2.3. Изменение температуры воды и воздуха вблизи поверхности океана (по А. В. Шумилу, «Природа», 1976, № 1, с. 88—94)

Длина черточки обозначает пределы колебаний температуры за время измерений (около 1,5 мин)

векция и вихри Ленгмюра. Установлено, что холодная пленка способна сохраняться при ветрах до 10 м/с, она разрывается обрушении гребня волны, но очень быстро, за несколько восстанавливается, гидродинамический режим в пределах пленки имеет ламинарный характер. Ниже холодной п

исходит активное перемешивание вод, усиливающееся на один — три порядка при возникновении вихрей Ленгмюра. В самих вихрях поверхностные воды погружаются, на участках же между вихрями происходит подъем вод из глубин. В результате создается локальная дифференциация граничных условий: формируется поле дырок, одна часть которых как бы открывает границу сверху, а другая — снизу. Такие дырчатые поля возникают и разрушаются, их пространственная привязка носит хаотический характер, в принципе они могут появляться на любом участке океана, где вблизи поверхности создается конвективная неустойчивость и неустойчивость ветрового течения.

Приведенная нами информация позволяет констатировать, что в основе планетарного функционирования границы океан — атмосфера заложен дискретный, дырчатый принцип взаимодействия. Несмотря на то, что в геометрическом смысле эту границу можно назвать сплошной, по своему физическому состоянию она дискретна. Ее дырчатость, по-видимому, предопределена существенно различной реологией, связанной с уровнями структуризации и резкой сменой термодинамических условий взаимодействующих сред, функции состояния которых терпят на границе разрыв.

Дискретность структуризации систем при наличии структурной памяти предопределяет организацию цепочки структур как новой системы. В этой цепочке каждая дискретная структура может быть охарактеризована своими параметрами состояния (временем жизни, линейным масштабом, степенями свободы и т. д.), а смена структур — вероятностями перехода со своей марковостью.

Поверхностные воды суши — атмосфера

Дискретность этой границы проявляется в первую очередь в ее геометрических особенностях, которые косвенно могут быть охарактеризованы через густоту речной сети и обводненностью территории. На картах по водному балансу суши, приведенных у М. И. Львовича [6], легко выделить области со значениями величины речного стока и величины испарения, превышающими норму для всей суши (соответственно 275 и 485 мм). Во всем южном полушарии и в северном до широты около 50° области аномального речного стока, как правило, находятся в пределах областей аномальным испарением, часто почти совпадая с ними. А так как речной сток и испарение в сумме равны величине осадков (с этой невязкой), эти аномальные области можно рассматривать одновременно и как источники, и как стоки. В одни периоды они выполняют функции преимущественно источников, в другие — преимущественно стоков. В этом и проявляется дырча-

Пространственная характеристика границы поверхностные воды суши — атмосфера

Страны света	Общая площадь с остро- вами, млн. км ²	Площадь бассей- на наиболее крупных рек		Площадь наибо- лее крупных озер		Площадь наиболее крупных водохранилищ		Площадь наиболее крупных ледников	
		млн. км ²	% от общей площа- ди**	тыс. км ²	% от общей площади	тыс. км ²	% от общей площади	тыс. км ²	% от общей площади
Европа	10,5	6,851	65	429	4,1	49	0,5	81	0,8
Азия	43,5	27,314	63	217	0,5	72	0,2	127	0,3
Африка	30,1	16,826	57	196	0,6	100	0,3	—	—
Сев. Америка	24,2	13,826	58	387	1,6	56	0,2	2019	8,5
Южн. Америка	17,8	12,974	72	28	0,2	9	0,05	25	0,2
Австралия	8,9	2,567*	29	34	0,4	0,8*	0,01	1***	—
Антарктида	14,0	—	—	—	—	—	—	14000	100
Вся суша с островами	149	80,496	56	1300	0,9	287	0,2	16253	11

* С Океанией.

** величины процентов округлены до целых чисел.

*** для Новой Зеландии.

тость данной границы. Ее дискретность складывается из геометрической и физической неоднородностей, представление о которых может дать таблица 2.1. Геометрическая неоднородность предопределена тектонической и эрозионной изрезанностью суши, а физическая — особенностями циркуляции атмосферных масс, хотя здесь существует и обратная связь. Разумеется, на этой границе возможны и такие явления, как термобарические сейши, ураганы, на озерах спирали Ленгмюра, холодная пленка и т. д.

Суша — океан

Если первые границы представляли собой различные части поверхности нашей планеты, то эта является береговой линией, отделяющей сушу от океана. По современным подсчетам ее протяженность оценивается величиной порядка $6,5 \cdot 10^5$ км (без Антарктиды) и $6 \cdot 10^5$ км (без территорий, сложенных глубоко промороженными породами). Через нее с суши в океан ежегодно поступает около $4,2 \cdot 10^4$ км³ воды, $3,53 \cdot 10^3$ т растворенных веществ и $15,7 \cdot 10^9$ т взвешенных и, вероятно, около $1,6 \cdot 10^9$ т влекомых наносов. Дискретность функционирования этой границы очевидна. Устье всякой реки может рассматриваться как разрыв границы, представляющей собой в масштабе Земли точечный источник. Поступление материала через такие источники сопровождается интенсивным турбулентным перемешиванием и диффузией. При этом происходит обмен импульсами речной и океанической вод, что приводит к постепенному падению скорости стокового течения с удалением от устья и создает логистический характер распределения солености на устьевом взморье.

Разумеется, этот процесс зависит от многих природных условий, но, вероятно, более всего контролируется расходом реки, изменения которого достаточно полно описываются гидрографом. Для предвычислений гидрографов половодий и паводков в гидрологии известны многочисленные аппроксимации. Самые современные из них, как, например, метод изохрон добегаания, имеют генетическую основу и позволяют не только достаточно детально описать естественное изменение расхода, но и раскрыть механизм формирования речного стока. Нас же интересует иная картина. Мы хотим получить абстракцию, пусть более грубую, но зато и более общую, которая бы выявляла сущность функционирования границы суша — океан. А сущность эта, по-видимому, заключается в следующем:

как р. 1) на протяжении геологической истории береговая линия сушебо-льш, как граница, испытывает постоянное перемещение, меняет вать однои протяженность; года они вы астки ее разрыва (устья рек) также имеют переменные гие — преимуще

3) через них в течение года происходит более или менее равномерный выброс воды в океан, на фоне которого возникают периодические весьма активные выбросы, по объему обычно превышающие среднегодовой суммарный сток.

По-видимому, для характеристики таких выбросов полезно ввести понятие кванта стока, удобное тем, что оно определяет общность подхода к механизму взаимодействия любых объектов на границе раздела. Разумеется, встает вопрос о длине волны, частоте ее «излучения», энергии и других показателях как параметров структуризации движения самого кванта.

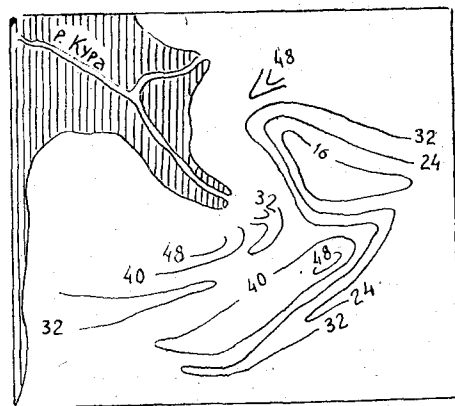


Рис. 2.4. Иллюстрация волнового характера выброса вещества через границу суша — океан (устье р. Куры, по А. Н. Шацкову, 1969)

Изолиниями показано распределение совокупностей фракций $< 0,01$ мм. Хорошо виден волновой характер распределения.

Мы сразу вспоминаем о многолетней периодичности стока, о паводковых пиках, существующих в течение десятков суток, нескольких часов и даже минут; появляется желание провести хотя бы формальную аналогию со световым спектром; приходит на ум идея Луи де Бройля о том, чтодвигающиеся материальные частицы любого сорта имеют волновую природу и понятие волны де Бройля применимо к движению центра масс частицы в целом. Кроме того, мы знаем, что волны де Бройля характеризуют не деформацию частиц, а распределение вероятности их появления в определенной области пространства. Например, большая амплитуда волны определяет высокую вероятность, а малая — низкую. Правда, принято считать, что для решения задач макромира вол-

новая природа вещества становится несущественной, так как волновые свойства больших масс невозможно увидеть.

Действительно, при массах и скоростях, характерных для макромра, длины волн окажутся ничтожно малыми в сравнении с размерами самих макрообъектов, настолько малыми, что их волновые свойства будут практически не осязаемы. Но вспомним, что всякая истина относительна, а необычные предположения, если они поддаются опытной проверке, могут из умозрительных стать объективными. Как раз нечто подобное произошло с идеями де Бройля. Попробуем и мы сделать рискованный шаг.

Теоретически волновая природа больших масс не должна быть видна. Возможно, что это правило для самих макрообъектов (больших масс), рассматриваемых обычно как сплошные среды, но на границах, разделяющих их, оно имеет исключения, которые можно назвать граничными парадоксами. Однако, будучи парадоксальными для физики макрообъектов, процессы пограничного обмена близки к идеям квантовой механики, в частности к идеям де Бройля (по крайней мере по своей форме). Чтобы убедиться в этом, достаточно обратить внимание на некоторые характерные черты функционирования хотя бы тех границ гидросферы, которые мы уже обсуждали:

1. Термобарические сейши как разновидность стоячих волн возникают на участках аномального разогрева океана, обычно за счет конвективного привноса. Они развиваются по волновым законам и продуцируют термобарические колебания на колоссальных расстояниях, часто огибающие земной шар по субширотным поясам. Однако сами волны производятся различными формами массопереноса воздуха и воды, т. е. перемещением материальных частиц. Квантовый дуализм здесь очевиден.

2. Нечто подобное, только в более концентрированном и ускоренном варианте наблюдается и при работе тепловых машин пятого рода (ураганах).

3. В отдельных точках береговой линии океана (через устья рек) происходит дискретный выброс материала суши, при этом наблюдается его интерференция и дифракция на предустьевом взморе (рис. 2.4).

Во всех случаях можно констатировать, что переход определенной макропорции вещества через дырку в границе создает волновой эффект передачи энергии от одного объекта к другому. Эту картину в самом общем виде можно представить себе так:

- а) материал из множества A во множество B выбрасывается через разрывы разделяющей их границы порциями; дуал.
- б) каждая порция несет какое-то количество движения (импульс P), которое создает тепловой и барический толчок; следовательно периодичность таких толчков, определяемая частотой ν , фективност к появлению волн тепла и давления;

г) распределение частиц из множества A во множестве B контролируется этими волнами.

Первое (линейное) приближение позволяет рассмотреть функционирование границы суша — океан с позиций понятия кванта стока. По-видимому, для решения такой общей задачи, как описание гидрологического функционирования береговой линии океана, необходимо прибегнуть к какому-либо формальному приему, позволяющему все природное разнообразие рек рассматривать в одних и тех же количественных рамках. Такой прием существует — это перенормировка параметров. Чтобы избежать вопроса, какой параметр принять за эталон приведения, будем выражать параметры в относительных величинах, изменяющихся от 0 до 1.

Разберем внутригодовое распределение стока любой реки (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Внутригодовое распределение стока р. Вольта (Африка)

Время (месяцы)	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV
Расход, проценты от среднего годового	1,89	2,26	3,52	8,75	17,89	22,80	22,39	10,36	3,66	2,58	2,08	1,82

Даты здесь расположены в таком порядке, чтобы подчеркнуть экстремум и разделить период увеличения расходов от периода их уменьшения. Очевидно, что существо внутригодового распределения стока не изменится, если за начало отсчета времени ($t_0=0$) принять момент максимального значения расходов (для р. Вольты — X месяц). Тогда период подъема кривой будет связан с отрицательными значениями t_0 (время отсчитывается в обратном направлении), а период спада — с положительными (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Переход от истинной временной шкалы (t) к условной (t_0)

t	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV
t_0	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6

Теперь перейдем к относительной шкале времени ($\bar{t}$):

$$\bar{t} = \frac{t - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} = \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}}. \quad (1)$$

В нашем случае $t_{\min} = 0$, поэтому

$$\bar{t} = \frac{t}{t_{\max}}; \quad 0 \leq \bar{t} \leq 1. \quad (2)$$

В такой же относительной шкале можно выразить и расходы (Q)*

$$\bar{Q} = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} = \frac{\Delta Q}{\Delta Q_{\max}}; \quad 0 \leq \bar{Q} \leq 1. \quad (3)$$

В нашем случае, $Q_{\max} = 22,8\%$, $Q_{\min} = 1,89\%$ (для периода подъема кривой) $Q_{\min} = 1,82$ (для периода спада). Используя выражения (2) и (3), табл. 2.2 можно выразить в относительных единицах (табл. 2.4).

Таблица 2.4

Внутригодовое распределение стока р. Вольта (Африка) в относительных величинах времени и расхода

$\bar{t}$	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0	0,17	0,34	0,5	0,67	0,83	1,0
$\bar{Q}$	0	0,02	0,08	0,33	0,77	1	0,98	0,41	0,09	0,04	0,01	1

Нетрудно догадаться, что такие кривые внутригодового распределения стока для любой водосборной площади (бассейна реки, регионального склона, континента) будут ограничены одинаково, а потому и сопоставлены. На рис. 2.5 приведено несколько произвольно взятых из литературы и пересчитанных в относительных величинах кривых $\bar{Q}(\bar{t})$. Даже эти немногочисленные примеры показывают, что форма кривой распределения меняется от выпуклой к вогнутой, первая характеризует размазанный сток, вторая — сосредоточенный. Развитие выпуклости, по-видимому, ограничено параболой:

$$\bar{Q} = 1 - (\bar{t})^2, \quad (4)$$

а вогнутость стремится к прямой, совпадающей с осью ординат.

Очевидно, что площадь, ограниченная кривой $\bar{Q}(\bar{t})$, представляет собой не что иное, как годовой объем стока W в относительных единицах, причем максимальное его значение ($W_{\max}$) очерчено параболой в пределах единичных отрезков аргумента. В

* Значения $\bar{Q}$ не зависят от того, в каких единицах даются измеренные величины.

соответствии с правилами математики для нашего случая это составляет: $W_{\max} = 1,33$. Переход от выпуклой кривой к вогнутой происходит через прямые, соединяющие единичные значения аргумента и функции, т. е. через площадь равнобедренного треугольника $W_{\Delta} = 1$ (см. рис. 2.5). По мере дальнейшего вгибания кривой $\bar{Q}(t)$ происходит закономерное уменьшение величины W — наблюдается как бы уменьшение объема годового стока. Мы сказали «как бы», потому что реальный сток определяется иными причинами. В нашем же случае удобнее принять, что годовой объем стока с любой площади в относительных единицах остается постоянным и равен 1,33, меняется лишь его распределение. Уменьшение величины W говорит о том, что порция стока становится более концентрированной, более сосредоточенной, а значит, и более мощной, возрастает относительный силовой импульс стока и его энергия. Пользуясь тем, что мы перешли к относительной шкале измерений, можно ввести некоторый параметр ε , который бы отражал энергию кванта стока и изменялся обратно пропорционально площади W :

$$\varepsilon W = \text{const}, \quad (5)$$

тогда можно записать:

$$\varepsilon_{\min} W_{\max} = \varepsilon_1 W_1 = \varepsilon_2 W_2 = \dots = \varepsilon_{\max} W_{\min}. \quad (6)$$

Резонно минимальное значение энергии кванта стока принять за единицу, из чего следует:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\min} \frac{W_{\max}}{W_i} = \frac{W_{\max}}{W_i}. \quad (7)$$

Рис. 2.5 показывает, что уменьшение параметра W определяется сокращением относительного времени паводка $\bar{t}_n$ (удобно его ограничивать точками, соответствующими на кривых $\bar{Q}(t)$ значением $\bar{Q} = 0,1$, что отвечает 10% ошибке, часто принимаемой в гидрологии). Вместо этого времени можно пользоваться обратной величиной:

$$\bar{\nu} = (\bar{t}_n)^{-1}, \quad (8)$$

характеризующей частоту приложения силового импульса, создающего квант энергии ε . Очевидно, что $\bar{\nu}_{\min} = 2^{-1}$ и увеличивается, стремясь к ∞ . Связь $\varepsilon(\bar{\nu})$ показана на рис. 2.5 и может быть аппроксимирована уравнением прямой, исходящей из начала координат:

$$\varepsilon = h_{\text{ст}} \bar{\nu}. \quad (9)$$

Уравнение регрессии зависимости $\varepsilon(\bar{v})$ построено по следующим данным:

Водосбор	$W \text{ см}^2$	ε	$\bar{t}_{II}$	$\bar{v}$
Площадь внутри параболы	33,3	1	2	0,5
Европа	10,5	3,17	0,85	1,18
р. Конго	18,5	1,8	1,32	0,76
р. Вольта	17,0	1,96	1,1	0,91
р. Замбези	19,5	1,71	1,46	0,68
р. Лимпопо	6,6	5,04	0,56	1,78
р. Нил	13,8	2,41	1,03	0,97
р. Сев. Двина	12,5	2,66	1,02	0,93

Уравнение регрессии позволяет оценить численное значение коэффициента $h_{ст} = 2,55$ (относительные единицы), который можно назвать постоянной кванта стока, считая ее универсальной, поскольку эта постоянная в одинаковой мере присуща квантам стока любого порядка и в рамках любого отрезка времени, а также описывает безусловную истину: сосредоточенный выброс массы всегда относительно мощнее рассредоточенного. Кроме того, очевидно, что при выбранной системе измерений уравнение (9) справедливо не только для рек, но и для всякого временного распределения макропереноса, а точнее, для всякого циклического явления.

Границы природных вод в атмосфере Земли

Атмосфера — это среда с существенно иной реологией, чем океан и поверхностные воды суши. Поэтому границы здесь имеют иное физическое выражение и на много порядков мобильнее по своей изменчивости (если пользоваться астрономической шкалой времени). В пределах тропосферы наиболее очевидными границами можно считать ярусы облачности.

Наиболее наглядную и полную информацию об этом типе границ дают методы космической метеорологии. Они позволяют охарактеризовать не только облачные макроструктуры синоптического масштаба, такие как облачные фронты, циклонические образования, облачность струйных течений, но и облачные системы мезомасштаба, дающие информацию о распределении воздушных потоков и стратификации атмосферы. Прекрасные иллюстрации облачных структур различных порядков и комментарии к ним читатель сможет найти в книге А. М. Германа [2]. Здесь же мы только подчеркнем, что все облачные образования демонстрируют дырчатый характер внутритропосферных границ гидросферы и их статистическую сущность. Облако — это зона конденсации водяного

пара, возникающая на пути его передвижения от поверхности Земли. Каждое облако выполняет запрещающие функции, оно как бы останавливает поток влаги. Между облаками для потока пара остается свободное пространство, выполняющее функции разрешающих дырок. Сложная и динамичная структура облачных скоплений может создать впечатление структурной хаотичности облачных границ. Но это кажущееся впечатление. Структурные преобразования облачных полей подчиняются определенным закономерностям, поддаются прогнозу и в ряде случаев даже управлению.

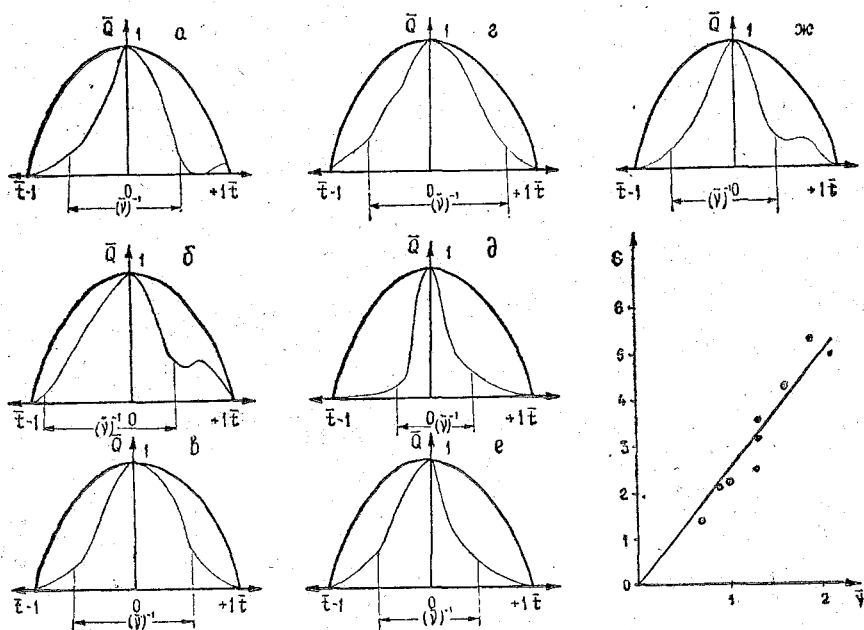


Рис. 2.5. Кривые внутригодичного распределения стока для некоторых рек земного шара (в относительных единицах) и зависимость $\varepsilon(v)$ $\varepsilon(v)$ — для Европы; б — р. Конго; в — р. Вольта; г — р. Замбези; д — р. Лимпопо; е — р. Нил; ж — р. Сев. Двина. Все кривые находятся внутри параболы

Изучение облачности как внутренней границы гидросферы в пределах тропосферы позволяет увидеть еще одну чрезвычайно важную их особенность — способность к структурной памяти: мезомасштабные особенности поля облачности контролируются морфологией подстилающей поверхности и ее термической неоднородностью. Это свойство границ раскрывает очень широкие возможности для их познания и моделирования. Оно должно предпо-

ределять внутреннюю симметрию системы, появление в ней марковских свойств, формирование определенных топологических образов и т. д.

В пределах тропосферы современная метеорология обычно различает три класса воздушных масс: тропический воздух (ТВ), воздух средних (умеренных) широт (УВ), полярный воздух (ПВ). Каждый класс приобретает свои свойства в определенных очагах формирования, их взаимодействие создает генеральную схему циркуляции вещества тропосферы. Особенности этой циркуляции подробно рассматриваются в книгах Х. П. Погосяна [9] и Э. Пальмена, Ч. Ньютона [8]. В течение года и за многолетний период границы фронтов испытывают существенные флуктуации как в пространстве, так и по контрастности своего проявления. Соответственные изменения испытывает и сама тропопауза, имеющая к тому же сложное листообразное строение. Ей присуща и способность к структурной унаследованности. Так, генерализированная ее форма, так же как и форма Земли, может быть аппроксимирована поверхностью двухосного эллипсоида, а фронты удивительно хорошо экстраполируются на критические широты.

Способность к структурной унаследованности хорошо проявляется и в коррелятивной связи величин геопотенциала * на различных высотах [9]. Эта связь как бы иллюстрирует процесс передачи информации (некоего физического образа) от одной материальной поверхности к другой в направлении уменьшения давления. Такая передача происходит с неизбежными энергетическими потерями и искажением за счет шумовых эффектов **, но суммарный сигнал, хотя и становится более слабым, основную топологию, по-видимому, сохраняет. Для нашей задачи это свойство колоссальной важности.

В стратосфере содержится очень мало водяного пара. Представление о его количестве и меридиональном распределении дает рис. 2.6. Он показывает, что у тропопаузы и на высоте около 30 км содержание парообразной воды на 1,5—2,0 порядка выше, чем в нижней четверти, кроме того, содержание пара уменьшается от экватора к полюсам. Именно на высоте около 30 км в стратосфере обычно наблюдается активная конденсация и образуются перламутровые облака. Вероятно, эту зону можно рассматривать как еще одну внутреннюю границу гидросферы. Поскольку стратосферная облачность существует не постоянно и при возникновении не является сплошной, ей могут быть приписаны те же свойства, что и облачным границам тропосферы.

* Геопотенциал $\Phi = gz$, где g — ускорение силы тяжести, z — высота.

** Мы рассматриваем внутренние границы гидросферы, и все, что не относится к ним, — это шум. Поэтому даже мощные, энергетически емкие процессы, в нашем случае могут оказаться шумом.

Облака, получившие название серебристых, периодически (чаще всего летом) появляются на высоте мезопаузы (~ 80 км). Ракетными исследованиями установлено, что они состоят из мелких метеоритных пылинок, покрытых корочкой льда. Метеорологи

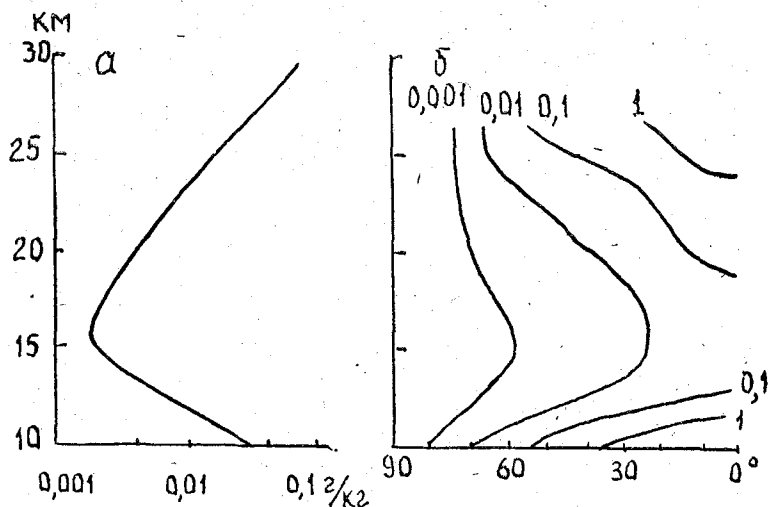


Рис. 2.6. Содержание водяного пара в стратосфере (а) и модель меридионального его распределения (б) [9]

считают, что в этой области конденсация паров воды с образованием твердой фазы обусловлена сильным охлаждением воздуха в результате адиабатического расширения (без потери энергии), происходящего при колебаниях атмосферы. Очевидно, что для потока уходящих за пределы Земли инградиентов воды серебристые облака должны выполнять ограничительные функции. Здесь же полезно напомнить, что с мезопаузой практически совпадает гомопауза, а сама 80-километровая сфера, из-за того, что вверх и вниз от нее температура понижается, является ловушкой для звуковых волн, поэтому она получила еще одно название — волновод. В периоды землетрясений и полярных сияний с ним связано появление сверхзвуковых ударных волн.

Страто- и мезопаузы изучены значительно хуже тропопаузы, однако на вопрос о существовании в них разрывов можно ответить положительно. Об этом говорят, во-первых, результаты ракетного зондирования атмосферы, которое зафиксировало струи вертикальной циркуляции до высот 30—140 км, и, во-вторых, анализ перестройки поля температуры и геопотенциала до высот 50—60 км. Эти и другие более тонкие обстоятельства позволяют специалистам полагать, что даже между мезосферной и тропосфер-

ной циркуляцией существует определенная связь. Больше того, некоторое влияние на циркуляцию в мезосфере оказывает и поверхность Земли. Во всяком случае контуры зимних мезосферных циклонов принципиально совпадают с генерализированной береговой линией океанов. Эта связь, по-видимому, является более глубокой, чем кажется на первый взгляд, так как отдельные наблюдения систематически регистрируют хорошую корреляцию перемещений неоднородностей слоя «Е» с направлением береговой линии моря (по данным ионосферной станции Кацивели).

Характерной особенностью верхней мезосферы и термосферы является ионизация воздуха. Молекулы воды, попадающие сюда, очевидно, полностью диссоциируют. Установлено, что область ионизации расслоена, в ней выделяется несколько зон с относительно повышенной ионизацией. Наиболее надежно фиксируются слои 60—80, 100—120, 180—200, 300—400 км, обычно обозначаемые D , E , F_1 и F_2 . Очевидно, что в этих слоях существуют оптимальные условия для ионизации, возможно из-за аномальной плотности воздуха по сравнению с плотностью в соседних зонах. Безусловно, что слои D , E , F_1 , F_2 для потока паров воды (как газа) будут выполнять функции барьеров, поскольку в них резко меняется форма массопереноса (от молекулярной к ионной). Имеются ли в этих барьерах разрывы, сказать трудно. Можно думать, что да, так как поток корпускул и ультрафиолетовое излучение Солнца, вызывающие ионизацию, не постоянны во времени и в пространстве.

Мы рассмотрели внутренние границы верхней части гидросферы, начиная с поверхности океана. Массоперенос внутри квазизамкнутых множеств, на которые она делится, а также функционирование самих границ обусловлены перераспределением тепла, поступающего от Солнца. Наверное поэтому в современной метеорологии атмосфера часто рассматривается как термодинамическая машина, которая тепловую энергию преобразует в механическую. Оценен даже КПД такой машины. По отношению к крупномасштабным атмосферным процессам его величина составляет приблизительно 1,7—2,0% [8]. В целом в атмосфере различают два вида глобального переноса: горизонтальный и вертикальный. Первый является основным, причем он настолько преобладает над вертикальным, что в теоретических моделях общеатмосферной циркуляции последним обычно пренебрегают. Для нашей же задачи главным является вертикальный перенос, поскольку именно он определяет обмен между составляющими верхней части гидросферы. В настоящее время установлено, что вертикальное движение контролирует процесс превращения потенциальной энергии в кинетическую и управляет перераспределением энергии. К сожалению, оценка вертикального переноса до сих пор представляет большие трудности. И все же удалось измерить не только его ско-

рости (на два-три порядка меньше горизонтальных), но и разрабатывать схемы связи с кинетической энергией.

Для работы любой тепловой машины (по второму закону термодинамики) необходимы холодильник и нагреватель. В зависимости от масштаба исследований их функции выполняют различные области гидросферы, что позволяет говорить о различных тепловых машинах. Например, зональная циркуляция тропосферы обусловлена присутствием постоянного положения холодильника в полярных областях и нагревателя — в тропических; муссонная циркуляция определяется теплообменом океан ↔ материка, при этом их функции как нагревателей и холодильников меняются по сезонам года; в стратосфере более холодными оказываются низкоширотные, а относительно нагретыми высокоширотные пояса. Появление облачности также может быть объяснено как результат работы некоторой тепловой машины. Например, аномально нагретый участок океана усиленно прогревает атмосферу и вызывает восходящее движение воздуха и влаги. На определенной (термодинамически критической) высоте влага конденсируется (работа холодильника), возникшая облачность экранирует поступление солнечной радиации, нагреватель остывает, облачность рассеивается — машина как бы переходит на холостой ход (ее КПД резко снижается). Затем происходит новое возбуждение, вызванное поступлением свежей порции тепловой энергии, и т. д. Различные природные тепловые машины постоянно взаимодействуют, создавая чрезвычайно сложную картину функционирования верхней гидросферы.

Заканчивая рассмотрение этой как бы негеологической части гидросферы, можно сказать следующее.

Нельзя познать целого, не познав его частей. Но познавая части и не интересуясь связями между ними, невозможно получить верное представление о целом. Именно в изучении внутренних связей и состоит решение парадокса целостности. Обсуждение этого вопроса для негеологической части гидросферы показывает, что связь между отдельными ее составляющими имеет дискретно-волновой характер. Поток воды (сейчас мы не рассматриваем формы массопереноса) в целом направлен от океана вверх к области диссипации. Многочисленными границами, выполняющими функции энергетических барьеров, он разбит на квазизамкнутые группы со своей внутренней динамикой, химическими превращениями и балансом. От группы к группе вещество гидросферы перемещается в виде отдельных порций (квантов) через дырки в границах. Этот процесс связан с возбуждением границ. Чтобы группа потеряла квант вещества, должна произойти структурная перестройка границы, приводящая к ее усложнению. В соответствии с законом изменения структурной энтропии структурное усложнение требует затрат энергии. Эта энергия выделяется кван-

том вещества (вспомним, что в атмосфере только при вертикальном переносе часть потенциальной энергии переходит в кинетическую). Вероятно, в процессе внутригрупповой циркуляции благодаря вертикальному переносу, хотя и маломощному в сравнении с адвекцией, у границы на участках дивергенции накапливаются значительные порции кинетической энергии, которые при достижении некоторой критической величины, взламывают границу (меняют ее структуру). Через эти разрывы происходит выброс вещества. По мере расходования кинетической энергии под действием внутренних сил, целостность границы восстанавливается и сохраняется до тех пор, пока не накопится новая порция энергии. Таким образом, внутригрупповой перенос вещества, определяющий замкнутость множества, происходит с выделением свободной кинетической энергии, благодаря которому замкнутость группы временно разрушается. Иными словами, внутригрупповая циркуляция работает как на формирование замкнутости каждой подсистемы, так и на формирование ее открытости.

Структурные особенности верхней части гидросферы хорошо согласуются с идеей единого материально-информационного поля, основанного на марковости или причинно-вероятностных схемах тренд — отклик. Действительно, границы гидросферы обладают структурной памятью, энергия и вещество через них выбрасываются порциями, информация об этих процессах проявляется в структурных изменениях границ, что воспринимается в форме таких явлений, как сейши, ураганы, исчезновение облачности, появление фронтов и так далее, т. е. через различные климатические феномены.

Границы в тектоносфере

Речь пойдет о границах, которые довольно широко обсуждаются в геологии. Поэтому основное внимание мы уделим не столько их описанию, сколько выявлению черт, позволяющих рассматривать возможные аналогии с так называемыми негеологическими границами. Кроме того, поскольку этой части гидросферы присущ иной масштаб времени, в описании границ будем ориентироваться на два аспекта: на современное их состояние и на особенности их исторического развития.

Опираясь на последние достижения геологии в изучении тектоносферы и мантии, а также на представление о гидрофизических зонах [4], можно выделить три наиболее крупные квазизамкнутые группировки вод ниже поверхности Земли. Это воды литосферы, астеносферы и подастеносферной мантии. Нетрудно видеть, что группы определены по структурным и петрологическим особенностям вмещающих сред. Это сделано по крайней мере на основании двух причин: во-первых, границы волновода установлены

экспериментально и хорошо прослеживаются методами геофизики, во-вторых, аналогичный принцип разделения природных вод был принят нами для так называемой негеологической части гидросферы, а также является основным в региональной гидрогеологии, изучающей гидрогеологические структуры, водоносные комплексы и горизонты.

Разумеется, названные три группы — это составляющие первого порядка. Каждая из них может быть разделена на более мелкие элементы, второго, третьего и так далее порядков. Например, в литосфере такое членение допустимо сделать по поверхностям Конрада и Мохо, в гранито-гнейсовом слое — по кровле фундамента, в осадочном чехле, по литологическим особенностям разреза.

Литосфера представляет собой сферическую плиту, воды находятся в ней главным образом в трещинах и порах и лишь частично являются одной из фаз магматических расплавов. У верхней границы литосферы преобладают воды метеогенного происхождения, у нижней — мантийного. В центральных же областях основная часть вод образуется, вероятно, *in situ* и в этом проявляется структуризация верхней части подземной гидросферы в самостоятельную квазизамкнутую мегагруппу. Генеральным процессом этой структуризации может быть метаморфизм горных пород. В опускающихся блоках происходит освобождение физически связанных вод и дегидратация минералов — возникает своеобразный как бы поток снизу вверх; в поднимающихся блоках, в силу их разуплотнения и уменьшения внутривещного давления, а также благодаря гидратации минералов возникают как бы потоки сверху вниз. Таким образом происходит процесс, напоминающий перемешивание.

Измеренные геофизическими методами свойства астеносферы современная геология связывает с состоянием частичного плавления мантийного вещества, квазиустойчивость которого может быть обусловлена только присутствием воды. Существование астеносферной мегагруппы подземных вод принципиально отличается от мегагруппы литосферы. В литосфере вертикальное движение блоков плиты и продуцируемого им движения как бы потоков воды не совпадают по направлению, в астеносфере же кривовая конвекция является общей для воды и вмещающей среды, поскольку вода растворена в определенных составляющих среды.

Как выглядит структуризация мегагруппы подземных вод, находящейся в подастеносферной мантии сказать трудно. Можно только предполагать, что, если переходная зона химически однородна и реологически пластична, то воды в ней распределены более или менее равномерно и структуризация мегагруппы повторяет структуру всей переходной зоны, разделенной глубинными разломами (до 700—800 км) на крупные блоки.

Выделенные мегагруппы охватывают воды с различными физическими свойствами. Гидрофизические границы в определенных зонах имеют резкое угловое несогласие с границами мегагрупп, что, вероятно, и определяет функционирование и существование подземной гидросферы (рис. 2.7).

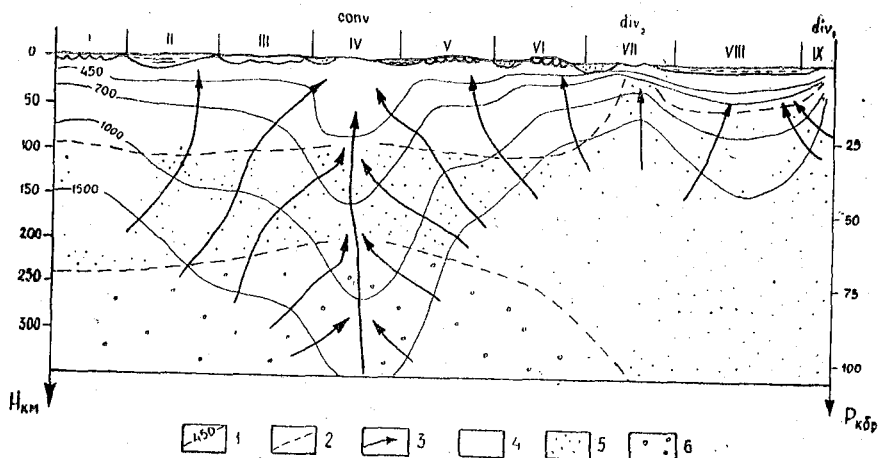


Рис. 2.7. Принципиальная схема соотношения мегагрупп подземных вод и гидрофизических зон (на основании схемы В. И. Кононова и В. А. Ильина [4]) I — миогеосинклинали КЗ; II — краевые прогибы МЗ; III — складчатые зоны РЗ; IV — щиты и платформы РР, А; V — складчатые зоны МЗ; VI — эвгеосинклинали КЗ; VII — островные дуги; VIII — океанические платформы; IX — срединноокеанические хребты.

1 — изотермы, °С; 2 — границы астеносферы; 3 — направление гипотетического потока подземных вод (*conv* — область его конвергенции, *div* — области его дивергенции). Мегагруппы подземных вод; 4 — литосферная; 5 — астеносферная;

6 — подастеносферной мантии. Гидрофизические зоны (по [4]):

1. Зона твердых вод со строгоупорядоченной структурой льда (до геоизотермы фазового перехода вода — лед). 2. Зона жидких структурированных вод (между геоизотермами фазовых переходов вода — лед и вода — пар до $t \approx 450^\circ\text{C}$). 3. Зона уплотненного флюида с субтаксической структурой $t \approx 450\text{—}700^\circ\text{C}$. 4. Зона мономерных молекул воды ($t \approx 700\text{—}1100^\circ\text{C}$). 5. Зона диссоциированных молекул воды ($t \approx 1100\text{—}3700^\circ\text{C}$).

На рисунке стрелками показано направление гипотетической диссипации воды в самых верхних оболочках Земли. Эти как бы линии тока проводились, исходя из следующих условий: во-первых, границы между гидрофизическими зонами (геоизотермы) являются эквипотенциалами, во-вторых, диссипация ориентирована снизу вверх. Оба условия основываются на значениях термодинамической энтропии, приводимой И. В. Кононовым и В. А. Ильиным [4] для гидрофизических зон (табл. 2.5).

Некоторые свойства воды в различных гидрофизических зонах (по [4]). Средние значения между max и min

Свойства	З о н а				
	1	2	3	4	5
Энтродия (термодинамическая), S_g	9,5	25,6	23,0	21,9	—
Вязкость, пуаз	3,0*	0,93	0,066	0,056	—

* У авторов работы [4] дается одна цифра.

Отраженное в таблице изменение энтропии хорошо согласуется с известными постулатами М. Планка и А. Капустинского:

$$\lim_{T \rightarrow 0} \Delta S_g = 0, S_g \rightarrow 0, \text{ когда } T \rightarrow 0$$

$$\lim_{P \rightarrow \infty} \Delta S_g = 0, S_g \rightarrow 0, \text{ когда } P \rightarrow \infty$$

(T — температура по Кельвину, P — давление).

К сожалению, нам неизвестны значения энтропий для вод, находящихся в атмосфере. Однако, исходя из существа только что приведенных постулатов, можно ожидать, что у поверхности Земли и выше изменением внутренней энергии гидросферы управляет поле температур, поскольку здесь значения его характеристик наиболее низкие, а в тектоносфере — положение контролируется гравитационным полем, поскольку здесь оно имеет наиболее высокую напряженность. Поэтому гидрофизическая зона 1, вероятно, подчиняется внешней энергетике (электромагнитному излучению Солнца) и как бы выпадает из общей энтропийной тенденции нижних зон. Увеличение энтропии говорит о рассеянии внутренней энергии системы и о стремлении ее перейти в более устойчивое состояние. Таким образом, принятые нами условия для проведения линий диссипации выглядят вполне естественными.

Эти линии образуют два типа областей: конвергенции и дивергенции. Первый тип приурочен к древним щитам и платформам, а второй — к системам островных дуг и срединных океанических хребтов. Важным обстоятельством является одинаковая направленность конвергентного и дивергентного потоков — снизу вверх. Однако геологическая роль этих областей различна (у каждой своя): в области конвергенции происходит активная гранитизация коры, в поясе островных дуг образуется кора преимущественно

но андезитового состава, для срединных океанических хребтов характерен базальтовый вулканизм. Ради удобства дальнейших рассуждений область дивергенции под океаническими хребтами (потому, что она выражена наиболее резко) назовем областью эвдивергенции и обозначим div_1 , а под островными дугами — областью мидивергенции с индексом div_2 . Эта область будет занимать как бы промежуточное положение между явно конвергентными, континентальными, и явно дивергентными, океаническими, «струями». Слово «струи» мы взяли в кавычки, чтобы напомнить, что физический смысл линий, названных нами линиями диссипации, пока неясен. Вероятно, это что-то вроде линий вектора напряженности в системе выделенных гидрофизических зон, границы между которыми выполняют роль эквипотенциальных поверхностей.

Возникает чрезвычайно любопытная ситуация. Отчетливо проявляются две структуризации подземной части гидросферы: одна физическая — по формам существования и массопереноса воды, другая — по пространственным и временным формам вмещающей среды. И эти различные структуризации нельзя представить раздельно, независимо друг от друга — они представляют собой как бы *коллективную структуризацию*. Гидрофизическая (внутренняя) составляющая работает на гомогенность системы, а внешняя (структура среды) — на ее гетерогенность.

Интуиция подсказывает нам, что именно в этой особенности скрыто то фундаментальное зерно, которое мы ищем. Поясним нашу мысль и проиллюстрируем ее геологическими данными. В самом общем виде коллективная структуризация может выглядеть следующим образом:

1. Геологическая среда (в пределах мегагрупп, групп различных порядков, подгрупп и т. д.) делит гидросферу на части, стремясь создать внутреннюю их изоляцию и сохранить для собственного использования, например, как термодинамический буфер в астеносфере, механизм выноса тепла и перераспределения материала в литосфере и т. п. Эти функции среды не вымышлены, не условны, они обеспечены процессами развития каждой геологической оболочки, каждого геологического объекта. Среда старается не выпустить находящуюся в ней воду, потому что без нее она не будет тем, что есть. Если расплав отдаст растворенную в нем воду, то в тех же условиях PT он перестанет быть расплавом; при известных значениях PT и недостатке в системе воды амфибол распадется на ассоциацию эклогитовых минералов и воду. В процессе такого распада он как бы старается ликвидировать дефицит воды для того, чтобы, ликвидировав его, остановить процесс уничтожения и спасти от гибели себе подобных. Это явление, вероятно, имеет очень глубокие корни, уходящие к принципу диссимметрии П. Кюри. Среда стремится удерживать воду, втягивая ее

в свои внутренние «дела», превращая ее в своего «компаньона», в часть самой себя.

2. Но у воды есть собственная задача, в нее вложен определенный космический код — она должна диссипировать к поверхности Земли и ищет пути покинуть среду, в которой она в данный момент находится. Реализация этого кода происходит в соответствии с законом изменения термодинамической энтропии. И здесь возникает свой внутренний порядок — гидрофизическая зональность. Там, где границы этого порядка более или менее параллельны структурным границам среды, происходит нормальная спокойная диссипация, среда не испытывает дефицита или избытка воды, существующий баланс вполне обеспечивает темп ее внутреннего использования, и две различные структуризации сосуществуют.

В областях конвергенции (сopv) возникают резкие отклонения от нормы, появляются как бы потоки (назовем их псевдодиссипативными струями), которые создают избыток воды, приводящий к смещению фазовых составляющих вмещающих сред сверху вниз (например, к смещению фациальных границ метаморфизма), т. е. к структурной перестройке сред. Этот процесс опять же является иллюстрацией гетерогенных тенденций среды, ее стремления удерживать воду, в данном случае — сделать возникающий избыток влаги нормой. А всякая перестройка — это нарушение стационарности, это ломка существовавшего ранее порядка. Таким образом, в областях конвергенции возникает структурный конфликт, приводящий в целом к аномальному ослаблению структуры среды. Суть этого конфликта определяется генетическим кодом гидрофизической структуризации — ее стремлением к гомогенности.

Геологическим следствием революционного столкновения гетерогенных и гомогенных тенденций в областях сopv, по-видимому, являются те эндогенные режимы, которые получили у В. В. Белоусова [1] название магматической активизации платформ: платобазальтовый и режим центральных интрузий и трубок взрыва. Толентовый характер платобазальтов и пестрый состав интрузий (от ультраосновных до кислых) хорошо согласуется со схемой кислотного выщелачивания Б. Г. Лутца [5], в основу которой вполне могут быть положены наши представления о коллективной структуризации подземной гидросферы.

Здесь будет уместно обратить внимание на одну особенность эволюции современного геологического мышления. Основное ее направление, на наш взгляд, удачно сформулировал Б. Г. Лутц: «Необходимо создать теорию **высокой степени общности***, способную связать воедино тектонические, магматические и метаморфические процессы, происходящие в земной мантии и коре» ([5],

* Подчеркнуто нами.

с. 154). Добавим от себя: эта общность даст ожидаемый эффект только в том случае, если она будет воплощена в каком-то физическом объекте. Иными словами, обобщение глобальных геологических процессов должно носить не отвлеченный, а конкретный материализованный характер. В последние годы в литературе, посвященной поискам такой общности, геологи все больше и чаще начинают вспоминать про существование воды. Теории, которые в своих построениях используют те или иные формы воды или ее свойства, оказываются наиболее простыми и хорошо верифицируются. Наверное, чтобы достигнуть той общности, которую имеет в виду Б. Г. Лутц, надо начинать с гидросферы как геологической системы.

Как же развивается коллективная структуризация в области эвдивергенции (div_1)? В отличие от конвергентных областей, здесь в верхних зонах должен возникнуть дефицит ювенильной влаги и, возможно, поэтому не происходит гранитизации коры, но поддерживается аномально высокая температура. В силу гетерогенных требований реакция среды на дефицит влаги может быть двойкой: она либо приспособится к нему, сделав ее нормой, либо ликвидировать его за счет иного источника.

Первый путь сложнее, он требует серьезных структурных изменений самой среды и, видимо, в какой-то мере реализуется через образование рифтов. Если принять за диссипативную норму количество воды в мегагруппах, которое соответствует условиям существования коллективной структуризации, то можно говорить, что уменьшение этой нормы ухудшает пластические свойства среды и увеличивает вероятность возникновения хрупких (неупругих) деформаций. Таким образом, при диссипативной норме воды целостность литосферного слоя, как правило, сохраняется (во всяком случае, серьезных разломов он не приобретает). В зонах же, где такая норма уменьшена, расколы литосферы наиболее вероятны. Итак, причина рифтовых расколов — это крупномасштабная конвекция в мантии, на участке расходящихся ячеек, а условия их появления — дефицит ювенильной влаги в областях подъема геоизотерм (см. рис. 2.7).

Вторая форма реакции среды на недополучение ювенильных вод (стремление восстановить диссипативную норму) может быть частично реализована через серпентинизацию перидотитов, о которой во многих своих работах писал Х. Хесс. Такая гидратация литосферы теоретически возможна за счет поступления в рифтовую структуру океанических вод. Нетрудно понять, что серпентинизация увеличивает общую пластичность среды и работает против рифта, в значительной мере снимая раскалывающее плитку напряжение, создаваемое конвекцией в мантии.

Таким образом, в областях конвергенции и эвдивергенции разрушение коллективной структуризации приводит к ломке границ

гидросферных мегагрупп, образованию в этих границах дыр и разрывов. Но эти дыры различны, как и сами области, во-первых, морфологически, во-вторых, генетически, в-третьих, по особенностям функционирования.

В областях конвергенции литосферные плиты работают на изгиб, дыры и разломы имеют региональную масштабность и являются одной из реакций среды выпустить излишки как бы нагнетаемой воды, которую она не успевает осваивать. Поэтому дыры здесь функционируют как клапаны, открывающиеся преимущественно снизу вверх. В областях эвдивергенции литосферные плиты работают в основном на растяжение, дыры и разломы имеют планетарную масштабность и возникают под действием мантийной конвекции в результате потери плитой пластичности. Дефицит ювенильных вод среда стремится восполнить за счет метеогенных, поэтому дыры здесь функционируют как клапаны, открывающиеся сверху вниз.

Области миодивергенции занимают промежуточное положение. Здесь, как и в областях эвдивергенции, возникает дефицит ювенильной влаги, среда также частично теряет способность к пластическим деформациям, но испытывает не растяжение, а сжатие, так как находится над сходящимися конвективными ячейками мантии. Стремление среды компенсировать дефицит воды, восстановить диссипативную норму компенсируется за счет внутренних источников — десерпентинизации перидотитов и общей метаморфической дегидратации погружающихся блоков сдавливаемых плит. Поскольку внутренний источник воды постоянно пополняется, то возможно периодическое появление излишков воды в среде (выше диссипативной нормы), и, как следствие, возникновение наложенной конвергентной ситуации. Поэтому возникающие в границах мегагрупп дырки здесь более универсальны, они открываются и вверх, и вниз.

Вот, пожалуй, самая общая картина строения подземной части гидросферы. Наиболее яркой ее чертой является взаимоотношение структуры среды и структуры находящихся в ней водных объектов (гидрофизических зон), названное нами коллективной структуризацией. Коллективные свойства проявляются через постоянство и прочность обратной связи. Поэтому найти в этой форме структуризации начало и конец, наверное, невозможно: структуризации среды и объекта появляются одновременно и одновременно исчезают. Критерием коллективных свойств является диссипативная норма (по крайней мере с помощью этого понятия удастся обнаружить какой-то общий порядок глобальных геологических событий).

4. О ПРИНЦИПАХ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМНОЙ МОДЕЛИ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ТЕРРАС

Изучение внутренних границ гидросферы привело нас к некоторым общим выводам о ее устройстве и функционировании. Земля как некая физическая система стремится уменьшить свою внутреннюю энергию и произвести работу. В соответствии с принципом минимальной диссипации наиболее выгодный для этого путь — конвективная форма теплопередачи. Чтобы она была возможной, передающие тепло среды должны обладать достаточно низкой вязкостью. Для вещества мантии приобретение таких свойств гарантируется присутствием воды, в литосфере и на ее поверхности конвективный вынос тепла осуществляют сами воды, в атмосфере — воздушные массы определенной влажности.

Итак, наиболее эффективный теплоперенос на планете Земля, по-видимому, происходит обязательно с помощью воды или при ее участии. Это свойство гидросферы обеспечивать самый высокий КПД геологической тепловой машины может быть названо *фундаментальным*. Оно определяется способностью воды к коллективной структуризации, по типам которой гидросфера расчленяется на квазизамкнутые группы разных порядков.

Теплоперенос в группах происходит под действием своего внутреннего градиента, но все группы находятся в поле PT с единым, общим для них всех энергетическим градиентом, контролируемым внешними, возможно, даже внегалактическими процессами. Поэтому границы групп периодически разрываются, в них возникают дыры и как результат ломки границ происходит выравнивание внутренних градиентов до соответствия с внешним.

Континентальная терраса как гидрогеологическая подсистема литосферной мегагруппы системы вода $\rightleftharpoons$ порода и часть общеземной тепловой машины, безусловно, отражает черты общего устройства гидросферы и ее внутренних границ. Как начало гидрогеологического изучения континентальных террас можно предложить два постулата:

1. В пределах континентальной террасы система вода $\rightleftharpoons$ порода стремится выработать некоторую собственную коллективную структуризацию, обособиться от общей системы, самоизолироваться. Благодаря процессам, реализующим эту тенденцию, возникают внешние границы нашей подсистемы, которые выполняют запрещающие функции. Речь идет о том, что внутри подсистемы формируется определенное структурное равновесие, а это значит, что сглаживаются собственные силовые градиенты.

2. В итоге все меньше освобождающейся (согласно второму закону термодинамики) внутренней энергии подсистемы расходуется на структурные процессы. Излишки ее постепенно накапливаются и, переходя в кинетическую энергию, разрушают на не-

которых участках внешние границы подсистемы, вырываются за ее пределы, совершая те или иные граничные процессы (границы выполняют разрешающие функции).

Очевидно, что открытие границ нарушает структурное равновесие (наверное, точнее — состояние, близкое к нему), внутренняя энергия вновь начинает расходоваться на его воссоздание и т. д. Запасы же внутренней энергии пополняются извне, благодаря аналогичному функционированию соседних подсистем.

В основе построения математических моделей гидрогеологических объектов, в том числе и шельфовых областей, лежит фундаментальная физическая идея — понятие двойственности природных систем и информационного поля, через которое мы эти системы воспринимаем. В любом проявлении суть дуализма окружающего нас мира состоит в сосуществовании двух тенденций: стремление к упорядоченности и необходимости уменьшить внутреннюю энергию. Первая тенденция связана с затратами энергии, вторая — с разрушением достигнутого уровня организации. Иными словами, природа создает, чтобы сломать, и ломает, чтобы построить. Созидательная тенденция дает нам информацию для членения целого на части, т. е. то, что принято называть классификацией и связано с анализом систем и явлений (в едином мы видим разное). Вторая тенденция позволяет в разном увидеть общее, что достигается синтезом информации.

С позиций дуализма природы система вода $\rightleftharpoons$ порода, являющаяся предметом гидрогеологии, может рассматриваться как изолированная и открытая одновременно. Обладая определенным запасом внутренней энергии, стремясь уменьшить ее и увеличить свою энтропию, эта система, будучи замкнутой, совершает работу сама над собой и структурно усложняется. Но сложные системы неустойчивы и стремятся к упрощению (как самостоятельный класс событий). Это упрощение совершается уже в открытой системе.

Можно утверждать, что согласно второму закону термодинамики, система теряет энергию, но эти потери в своей основе не диссипативны (диссипация лишь фон), а периодичны и носят квантовый характер. Если система не получает энергию извне, она переходит на более низкий энергетический уровень (повышает свою энтропию) как бы скачками. Если исключить диссипацию, то можно говорить, что, находясь на энергетическом уровне, система функционирует как изолированная, при переходе же на другой уровень она развивается как открытая система. Если же происходит поступление энергии извне, то система лишь меняет энергетические уровни в обратном порядке, энтропийный же дуализм сохраняется.

Очевидно, что дуализм природных систем предопределяет и форму их функционирования — цикличность: от простого к

сложному, затем опять к простому, чтобы повторить это многократно. Развитие подчинено закону спирали, поэтому циклы меняются, но циклы, близкие во времени, благодаря структурной памяти систем, обычно похожи настолько, что наши аппроксимации позволяют их считать идентичными.

Коллективная структуризация — это тоже форма природного дуализма (во всяком случае, гидрогеологического, систем вода $\rightleftharpoons$ порода), но форма более высокого, может быть второго порядка. Она как бы раскрывает механизм энтропийного дуализма, показывая на каких принципах создается, существует и разрушается организованность системы. Для шельфовых областей этот принцип может быть проиллюстрирован как процесс дегидратации. С начала мезозоя большинство шельфов погружалось как окраины континентов. Глубины моря в их пределах практически оставались без изменений за счет компенсированного осадконакопления. В этом процессе все шельфовые осадки перемещались с верхнего энергетического уровня гравитационного поля Земли (с поверхности литосферы) на нижние, проходя элизионный этап развития. В результате увеличения внутрипластового давления, уплотнения и перестройки структуры порового пространства, осадки, а потом и сформировавшиеся из них породы теряли капельно-жидкую воду. Рушился прежний уровень организованности пластовой системы вода $\rightleftharpoons$ порода. Воссоздание его происходило за счет десорбции физически связанных вод. Эта схема, известная сейчас всем гидрогеологам, с позиций общих принципов структурной организованности имеет некоторые тонкости. Система не просто теряла сингенетичную капельно-жидкую воду и вместо нее приобретала десорбированную физически связанную, в системе физически связанная вода могла оставаться *in situ*, но приобретала свойства гравитационной влаги. Иными словами, сохранение коллективной структуризации заключается не в том, что система сохраняется в неизменном виде, а в том, что происходит реконструкция разрушенного уровня организованности системы, т. е. соотношения основных ее составляющих. Была гравитационная вода и минеральные зерна осадков. Изменилась структура толщи, но уровень структуризации системы вода $\rightleftharpoons$ порода остался прежним: поры все равно заполнены водой со стандартными свойствами (способностью к растворению, температурой кипения, замерзания, структурой и т. д.), присущими данной гидрофизической зоне [4]. Уровень структуризации консервативен. Для большей наглядности сошлемся еще раз на пример другой гидрофизической зоны — фации амфиболитового метаморфизма. Здесь восполнение потерь поровых вод происходит в результате разрушения амфиболов, которые, «погибая», как бы спасают себе подобных, стремясь сохранить присущий этой зоне уровень организованности системы вода $\rightleftharpoons$ порода.

Дуализм коллективной структуризации гидрогеологических систем заключается в том, что это, с одной стороны, внутренний процесс, работающий на изолированность системы, стремящийся сохранить ее как самостоятельный класс объектов в новых условиях, с другой — этот же процесс создает предпосылки для разрушения реконструируемой структуризации. Например, переход физически связанных вод в свободную форму воссоздает начальный структурный статус системы, т. е. организационно сохраняет ее, но одновременно система теряет этот внутренний относительно устойчивый запас воды, который позволяет поддерживать существующий уровень структуризации вода $\rightleftharpoons$ порода. И когда этот запас будет исчерпан, система перейдет в другой класс, сменит уровень структуризации. Иными словами, коллективная структуризация — это инструмент, который как бы охраняет систему от внешних посягательств, помогает ей сохранить себя как индивидуальность, но одновременно создает условия для перерождения, чтобы не быть уничтоженной как гидрогеологическая система.

Таким образом, теория приводит нас к идее циклического (точнее, квазипериодического) развития гидросферы как геологической системы, а значит, и тех подсистем, из которых она построена, в частности, континентальной террасы. Такой цикл можно рассматривать как наиболее вероятный многопараметрический образ, изменения которого ограничены максимально простой и максимально сложной матрицами различных спектральных функций. Устойчивость образа определяется группой преобразований, и сам образ представляет собой математическую группу.

Читатель, безусловно, уже понял, куда клонит автор: Шельфовые области — это часть общеземной гидрогеологической системы. И модель ее следует строить на принципах общих для системы в целом (принципы должны быть одинаковыми для любых ее составляющих). Это основа всякой науки, и здесь могут быть лишь временные исключения. Как ни печально, но мы оказываемся в самом начале реализации этих принципов, поскольку их формулировка представляет собой новый акт веры, дедуктивной надстройки над которой еще нет. Чтобы создать ее, необходимы, с одной стороны, новые эмпирические факты, с другой — новая информация на основе уже накопленных наблюдений, такая, например, как спектральные характеристики, Т-матрицы и т. д. Но главное определено — это принципы, на которых следует продолжать строительство науки гидрогеологии, и гидрогеологическая модель шельфовых областей будет ее частью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В. В. Основы геотектоники. М., 1975. 262 с.
2. Герман М. А. Спутниковая метеорология. Л., 1975. 367 с.
3. Каплин П. А. Новейшая история побережий мирового океана. М., 1973. 265 с.
4. Коноиов В. И., Ильин В. А. О состоянии и поведении воды в земных недрах в связи с процессами метаморфизма. — В кн.: Значение структурных особенностей воды и водных растворов для геологических интерпретаций. М., 1971, вып. 2, с. 35—65.
5. Лутц Б. Г. Химический состав континентальной коры и верхней мантии Земли. М., 1975. 167 с.
6. Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М., 1974, 448 с.
7. Наливкин Д. В. Ураганы, бури, смерчи. 1970, 488 с.
8. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы. Л., 1973, 615 с.
9. Погосян Х. П. Общая циркуляция атмосферы. Л., 1972, 394 с.
10. Проблемы геологий шельфа. М., 1975. 295 с.
11. Слевич С. Б. Шельф. Освоение, использование. Л., 1977. 240 с.
12. Шепард Ф. П. Морская геология. Л., 1969. 461 с.
13. Шепард Ф. П. Морская геология. М., 1976. 488 с.
14. Шулейкин В. В. Физика моря. М., 1968. 1084 с.
15. Шулейкин В. В. Строение поля тропического урагана. Докл. АН СССР, 1976, т. 186, № 3, с. 578—582.

СОДЕРЖАНИЕ

Тема 1. Морфологические и геоструктурные особенности шельфовых областей	3
1. Морфологические схемы	4
2. Геоструктурные схемы	7
3. Понятие шельфа как системы	12
Тема 2. Гидрогеологические границы континентальной террасы	16
1. Граница океан — литосфера	16
2. Нижняя граница	20
3. Наиболее общие свойства границ	22
4. О принципах построения системой модели континентальных террас	49
Литература	53

Александр Николаевич Павлов

ШЕЛЬФ КАК ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Конспект лекций

Редактор *И. Н. Базилевская*

Сдано в набор 08.04.80. Подписано в печать 31.12.80. М-23540. Формат 60×90/16.
Бумага тип. № 2. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 3,3. Уч.-изд. л. 3,5. Ти-
раж 500 экз. Темплан 1980 г., поз. 461. Заказ 654. Цена 65 коп.
ЛПИ имени М. И. Калинина, 195251, Ленинград, Политехническая, 29.

Типография ВВМУПП им. Лен. комс.