

Байкальский рифт: на пути к океану

В.Д.Мац, Л.З.Гранина, И.М.Ефимова



Озеро Байкал, занимающее Байкальскую рифтовую впадину в центральной части Байкальской рифтовой зоны (рис.1), с давних пор привлекает внимание путешественников, естествоиспытателей различных направлений и самые широкие слои населения России и зарубежных стран.

Научные исследования здесь начались в XVIII в. С первыми экспедициями Российской императорской академии наук на Байкале связаны имена Д.Г.Мессершмидта, И.Г.Гмелина, И.Г.Георги, П.С.Палласа и др. В конце XIX в. политические ссылки — поляки Б.И.Дыбовский, А.Л.Чекановский, И.Д.Черский, — а также российские геологи В.А.Обручев и М.М.Тетяев заложили основы современных научных представлений о строении, геологии и биологии Байкала. В начале XX в. была организована Байкальская научная экспедиция, преобразованная затем в Байкальскую лимнологическую станцию Академии наук СССР. Ее основатель и научный руководитель — один из крупнейших лимнологов страны — Г.Ю. Верещагин. На базе этого первого академического учреждения за Уралом позднее, в 1961 г., возник Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук. В 1990 г. по инициативе его директора М.А.Грачева создается первый в стране Международный центр научных экологических исследований на Байкале. Хотя и раньше здесь реализовывались крупные междисциплинарные научные проекты, с привлечением научных коллективов из Бельгии, Великобритании, Германии, США, Швейцарии, Японии и других стран исследования перешли на новый уровень и принесли чрезвычайно много научной информации.

Одними из приоритетных научных направлений стали палеоклиматические реконст-



Виктор Давидович Мац, доктор геолого-минералогических наук, профессор, долгое время работал в Лимнологическом институте СО РАН. Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов — региональная геология юга Восточной Сибири, рифтогенез.



Либа Залмановна Гранина, доктор геолого-минералогических наук, работала в том же институте. Специалист в области геохимии донных отложений, гидрохимии, лимнологии Байкала.



Ирина Михайловна Ефилова, младший научный сотрудник Института Земной коры СО РАН. Круг научных интересов охватывает вопросы геоморфологии и палеогеографии Байкальской впадины.

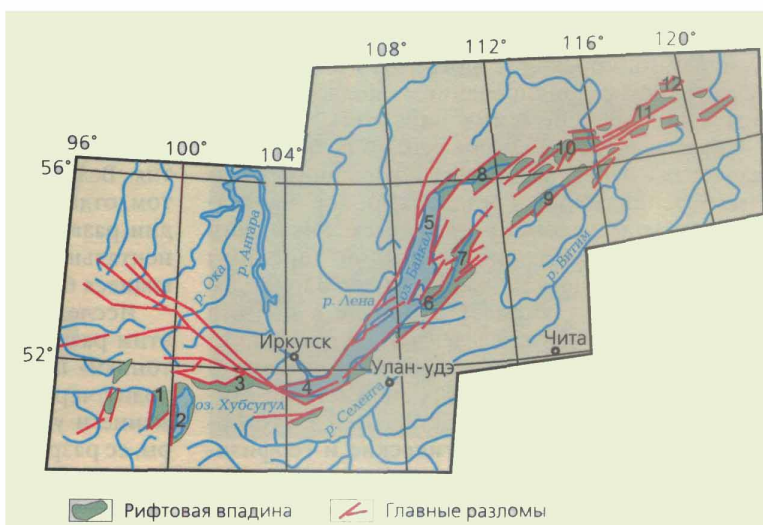


Рис.1. Байкальская рифтовая зона. Цифрами на схеме обозначены крупные рифтовые впадины: Дархатская (1), Косогол (2), Тункинская (3), Южнобайкальская (4), Северобайкальская (5), Усть-Баргузинская (6), Баргузинская (7), Верхнеангарская (8), Ципинская (9), Муйская (10), Чарская (11), Токкийская (12).

© Мац В.Д., Гранина Л.З., Ефилова И.М., 2014



Рис.2. Буровая платформа на барже, вмороженной в лед. Максимальная глубина пробуренных донных отложений Байкала 600 м. Детальное комплексное изучение полученных кернов позволило разработать уникальный пространственно-временной геохронометр и восстановить этапы развития природы за отрезок времени в 8 млн лет (с позднего миоцена).

Фото В.А.Короткоручко

рукции, установление деталей строения и истории геологического развития Байкальской впадины как типовой структуры континентального рифта. Для решения данных задач очень важно изучение осадочной толщи, заполняющей впадину, методами морской геологии. Это сейсмостратиграфическое зондирование и подводные исследования на обитаемых аппаратах «Пайсис» и «Мир». Особенно больших усилий потребовали разработка и реализация глубоководного научного бурения озерных осадков. Проект «Байкал-бурение» (рис.2) был предложен американским профессором Университета Южной Каролины Д.Вильямсом, а выполнялся под руководством академика М.И.Кузьмина [1]. Наряду с новыми подходами продолжалось изучение традиционными геологическими и геофизическими методами [2, 3]. Новейшие и ранее полученные данные позволили достаточно детально и достоверно охарактеризовать геологические и геофизические особенности Байкальской впадины, реконструировать ее геологическую историю и использовать полученные материалы для изучения общих вопросов рифтогенеза, палеоклимата, глобального прогноза климатических изменений, биологической эволюции, биоразнообразия, астрофизических явлений и др. Байкал стал подлинной природной научной лабораторией.

Тектонотип континентального рифта

Со времен работ Е.В.Павловского [4], показавшего родство байкальских структур со структурами великих восточноафриканских озер, а главным образом после исследований Н.А.Флоренсова [5] Байкальская впадина рассматривается как внутриконтинентальный рифт (от англ. gift — расселина, трещина, впадина). Этот термин ввел в науку в 1896 г. английский геолог Дж.Грегори. Так он обозначил Кенийский грабен в Восточной Африке.

Рифтовые впадины часто вмещают крупные озера (такова, например, впадина оз.Танганьика). Эти линейные грабеновые структуры ограничены с одной или двух сторон разломами (сбросами и сдвигами) и разделены перемычками, в которых на поверхность выходят древние породы фундамента. Впадина вместе с осложняющими ее структурами и сопровождающими горными поднятиями (плечами) и составляют рифт (рис.3, 4).

Сбросы, ограничивающие впадины и выполаживающиеся с глубиной, называются листрическими, а те, амплитуда которых по простиранию изменяется, — шарнирными. Особенности геометрии сбросов играют важную роль в развитии рифтовых впадин [6].

Рифты формируются в условиях напряжений растяжения, тогда как все структуры континентальной земной коры существуют в условиях сжатия. Вследствие этого блоки, разделенные рифтом, отдаляются друг от друга, что на ранней стадии развития и приводит к образованию континентальных впадин, которые разделяют отодвигающиеся блоки.

Исследования океанов и последовавшая за этим разработка теории «новой глобальной тектоники» показали, что образование океана происходит через рифтогенез. С ним связано раздвижение и утонение континентальной земной коры, ее разрыв, внедрение во вновь образовавшуюся зону глубинных масс и формирование океанической коры. Этот процесс обозначают термином «спрединг» (раздвиг). Дальнейшее его развитие приводит к удалению друг от друга континентальных бортов первоначального рифта, расширению зоны океанической коры, формированию океана. Одним из наиболее выразительных примеров такого развития служит Атлантический

океан. В его центральной зоне возникают срединно-океанический хребт и рифт, в раздвигающуюся зону которого внедряются субвертикальные тела глубинных пород. Последние в каждый данный момент образуют океаническую кору, а более древние участки дна отодвигаются к периферическим частям океана. Таким образом происходит его разрастание. Этот процесс настолько доказательно аргументирован, что вошел в учебную литературу [7].

Идея о принадлежности Байкальского рифта к такому эволюционному ряду геологических

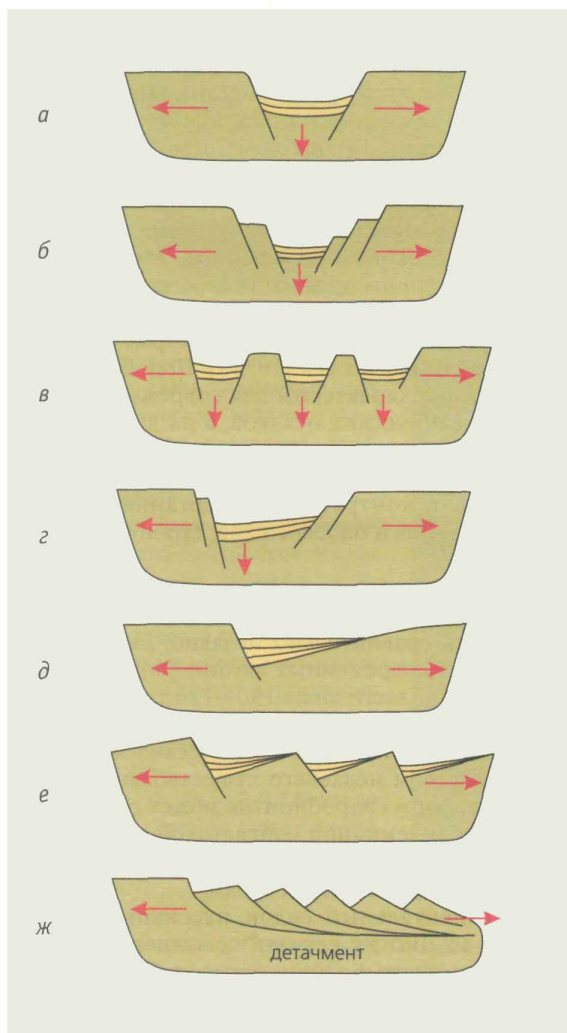


Рис.3. Грабеновые структуры рифтовых впадин: а — простой симметричный грабен; б — ступенчатый (телескопированный); в — клавиатура блоков; г — асимметричный грабен; д — полуграбен на наклонном блоке; е — комбинация полуграбенов; ж — система из односторонне наклоненных блоков, относительно смещенных по листрическим сбросам и опирающихся на субгоризонтальную поверхность срыва растяжения (детachment).

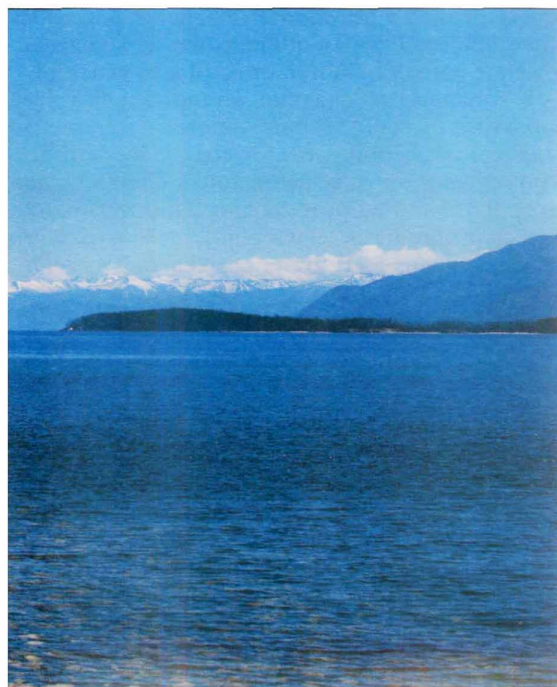


Рис.4. Горные хребты окаймляют рифтовую впадину. Вверху: заснеженные вершины Байкальского хребта — северо-западное плечо. Внизу: Баргузинский хребт (на дальнем плане) — восточное плечо; хребт п-ова Святой Нос (справа) и Ушканьи о-ва (ближний план) — вершины подводного Академического хребта, разделяющего Северную и Центральную впадины Байкала. Вид с о.Большой Ушканий.

Фото И.М.Ефимовой

структур, поступательное развитие которых в конечном итоге приводит к образованию океана, далеко не нова. Покажем три стадии развития рифтогенеза — три показательных примера.

Байкальский рифт, в котором сохранилась континентальная кора, но ее мощность на данном этапе существенно сокращена, а борта раздвинуты незначительно — на 15–20 км.

Красноморский рифт, где континентальная кора разорвана и отодвинута на несколько сотен километров, а в зону разрыва активно внедряются глубинные массы.

И наконец, Атлантический океан. Здесь континентальные массы раздвинуты и удалены на тысячи километров, а посередине сформировался океанический хребет, в центральной части которого протягивается рифтовая впадина и реализуется спрединг.

Это, конечно, не означает, что каждый континентальный рифт обязательно преобразуется в океан. Рифтогенез может прерваться на одной из ранних стадий.

В приведенной схеме Байкальский рифт фигурирует в качестве начальной стадии формирования океана, и, казалось бы, наше рассмотрение не отличается новизной. Но это не так, поскольку только сейчас в результате новейших исследований стало возможным подтвердить это общее положение конкретными научными аргументами.

В Байкальской впадине установлен ряд явлений, которые свойственны океанам и неизвестны в других пресноводных озерах. Особенности строения впадины, вещественный состав ее донных отложений и протекающие в них физико-химические процессы свидетельствуют о том, что Байкал находится на пути превращения в океан.

Строение Байкальской впадины

Некоторые особенности морфологии и строения осадочного чехла сближают Байкал с морскими и океаническими бассейнами. Черты сходства отчетливо проявляются в строении западного борта Байкальской впадины и пассивных (восточно-атлантического типа) окраин океана. Это связано с наличием крутого сбросового подводного склона, переходящего в высокий и крутой надводный, а также с высокой сейсмической активностью (рис.5). В рельефе Байкальской впадины, как и в океане, выделяются шельф, склон (как некоторый аналог континентального склона), совпадающий с разломной зоной, и глубоководная аккумулятивная равнина. Шельф на Байкале очень узкий, местами он отсутствует, и подводный разломный склон непосредственно продолжается в надводной части.

Морфология западного борта определяет многие важные черты седиментации. Механизм транспортировки терригенного материала и осадкона-

копления в Байкале существенно отличается от присущего мелководным плоским озерным бассейнам и приближается к характерному для водоемов морского и океанического типа. Близкое соседство наземных и подводных крутосклонных элементов берега способствует трансформации селевых потоков, зарождающихся в надводной части склонов, в подводные мутьевые (суспензионные) потоки. Их образованию также способствуют оползневые явления, развитие которых связано не только с гравитационной неустойчивостью слабо консолидированных осадков, но и с сейсмической активностью рифта, с наличием скоплений газогидратов. Склон, подобно океаническому, рассечен поперечными подводными каньонами-разломами, соединяющими зону шельфа с подножием. К последнему, так же как и в океане, примыкает зона «лавиной седиментации» [8]. Ее существование подтверждено нахождением депоцентров (зон максимальной мощности) донных отложений у подножия западного борта впадины [9].

По подводным каньонам мутьевые потоки достигают глубоководной равнины. Здесь переносимая ими терригенная часть вещества осаждается под действием гравитационной дифференциации, образуя слои турбидитов, которые на Байкале подробно изучаются [10, 11]. Подобные отложения весьма характерны для современных морских и океанических осадков, а их древний аналог — флиш — типичен для геологических разрезов геосинклиналей. В современных озерах, где отсутствуют контрастные сочетания высоких крутых склонов и плоского дна, турбидиты не образуются.

Ультраглубоководная (более 1000 м) зона Байкала не была присуща ему изначально. Она сформировалась сравнительно недавно, около 1 млн лет назад. А современных глубин (более 1600 м) Байкал достиг всего лишь 150–120 тыс. лет назад. Образование глубоководной зоны послужило толчком к появлению специфических животных. Свидетельством недавнего существования глубоководных форм гидробионтов может служить образ жизни эндемичной байкальской рыбки голомянки, которая в течение суток мигрирует из глубин к приповерхностным слоям.

Континентальный склон пассивных окраин океанов во многих случаях осложнен краевыми плато. Это плато Блэйк у берегов Флориды, Вёринг у берегов Норвегии, Иберийское напротив побережья Испании, Эксмут и Квинслендское около Австралии и многие другие [7]. Плато ограничены листрическими сбросами, поэтому их поверхность наклонена в сторону континента (см. рис.4,ж).

Для морфоструктуры байкальских склонов характерны краевые ступени — миниатюрный аналог краевых плато океана. Это значительные разрывы тектонические блоки, выделяющиеся в надводном и подводном рельефе. Наиболее вырази-

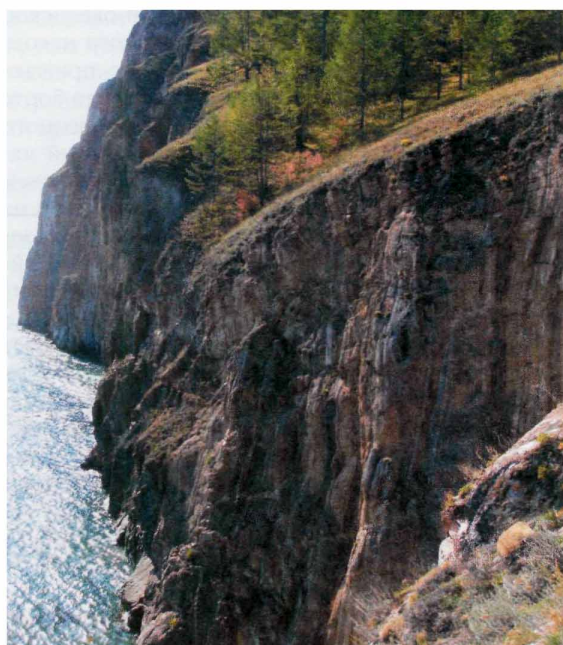
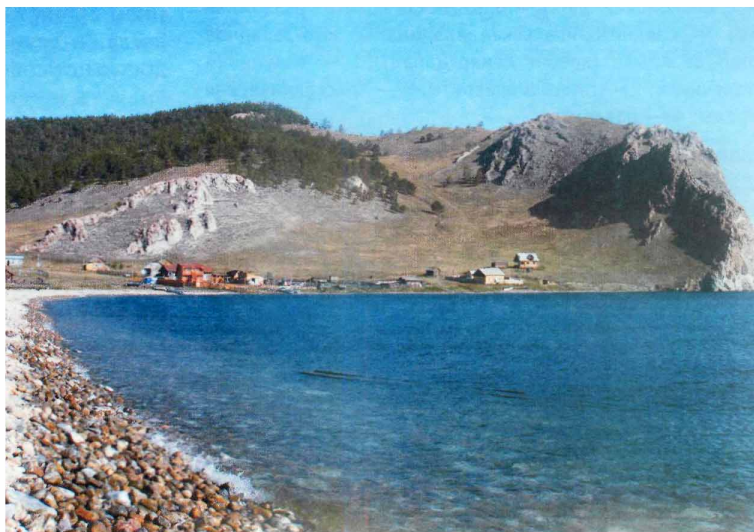


Рис.5. Гигантские уступы в надводном и подводном рельефе рифтовой впадины. Вверху слева — западный борт Средне-Байкальской впадины, Ольхонская краевая разломная зона, сбросовый бортовой уступ, выраженный в надводном рельефе. Справа — юго-западный борт краевой разломной зоны Южно-Байкальской впадины, разлом Черского. Район Кругобайкальской железной дороги. Внизу — внутреннее строение разломной зоны, которая включает множество частных тектонических блоков, разделенных разрывными смещениями. Восточный склон Ольхонского блока. Район метеостанции Узур.

Фото И.М.Ефимовой
(вверху слева и внизу)
и Е.Г.Вологиной



тельные надводные Приольхонская и Котельниково-тыйская ступени. Они вытянуты вдоль рифта на многие десятки километров, а в ширину достигают 20—30 км. Их малый подводный аналог — Заворотненская ступень (в районе мыса Заворотный). Краевые ступени примыкают к западному (северо-западному) бортовому разлому Байкальской впадины. Платообразная поверхность ступеней полого наклонена к поднятому плечу рифта, что также обусловлено листрическим типом разломов, ограничивающих блоки. Формирование выполаживающихся сбросов, по-видимому, связано с наличием системы древних надвигов на

границе Сибирской платформы и Байкальской складчатой области. При образовании рифта в условиях напряжений растяжения шарьяжно-надвиговые структуры сжатия преобразовались в листрические сбросы. Структура бортовых зон Байкальского рифта в области развития краевых ступеней в миниатюре повторяет структуру пассивных окраин океана (рис.6). Это вполне объяснимо, так как развитие пассивной окраины осуществляется через рифтогенез.

Определенное сходство обнаруживается также в строении осадочных толщ Байкала и океана. Общая мощность осадочных отложений озера дости-

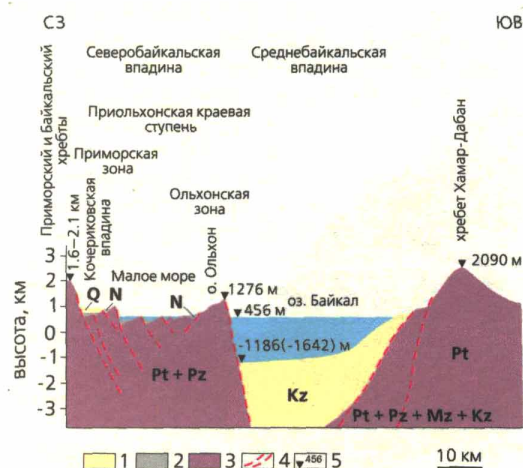


Рис.6. Схема морфоструктуры Байкальского рифта. Сечение по профилю: западное поднятое плечо (Байкальский и Приморский хребты) — Приморская разломная зона (западный краевой разлом Северо-Байкальской впадины) — юго-западное окончание Северо-Байкальской впадины (Приольхонская краевая ступень, Маломорский блок, Ольхонский блок) — Ольхонская краевая разломная зона — Средне-Байкальская впадина — юго-западное поднятое крыло (хребет Хамар-Дабан). 1 — валуны и галечники; 2 — глины и алевроиты; 3 — кристаллические породы; 4 — разломы.



Рис.7. Карта мощности донных отложений Байкала [8]. Области их максимальных мощностей (депоцентры) прижаты к западным (северо-западным) бортам Байкальской впадины, где проходят ограничивающие ее краевые разломные зоны. Такое распределение мощностей — свидетельство общего наклона фундамента Байкальского рифта к западу (северо-западу), что обусловлено листрическими краевыми разломами.

гаёт 8.5 км [9], что близко к мощности океанской осадочной толщи. Область максимального накопления осадков (депоцентр) на Байкале прижата к подножию западного борта, куда с крутого борта впадины поступает основная масса терригенного вещества (рис.7). Более крупный обломочный материал накапливается вблизи борта, а мелкозем мутьевыми потоками выносится к подножию и на глубоководную равнину — некоторое подобие зоны лавинной седиментации океанических бассейнов. Осадочный клин (если отвлечься от района дельты р.Селенги) утоньшается до 1.5—2.0 км к восточному борту впадины. Одновременно возраст базальных слоев уменьшается, и на фундаменте, поверхность которого наклонена в сторону поднятого плеча рифта, лежат более молодые слои. Можно предполагать, что в основании осадочной толщи сформировалось несогласие растяжения, характерное для океанических бассейнов. Однако основной механизм, регулирующий мощность осадочной толщи океана, принципиально иной. Там он определяется огромными размерами океанической впадины, а на Байкале — концентрацией значительной части терригенного вещества в прибортовой зоне. Скорее всего, океанический механизм начнет действовать значительно позднее, когда (и если) Байкальская структура в развитии достигнет собственно океанской стадии.

Состав донных отложений, газогидраты и нефтепроявления

Благодаря многолетним исследованиям, проведенным сотрудниками Лимнологического института СО РАН, установлены особенности строения, состава донных отложений и протекающих в них диагенетических процессов, многие из которых не свойственны пресноводным озерам, а присущи морям и океанам [12]. Так, Байкал — единственный пресный водоем, в котором найдены газовые гидраты — твердая смесь воды и метана, в которой на один объем воды приходится 150—180 объемов метана. Первые упоминания о возможности существования здесь газогидратов относятся к концу 1970-х годов. Тогда подняли насыщенные газом керны с нарушенной первичной структурой, что было расценено как последствия разложения газогидратов.

В 1989—1992 гг. при сейсмостратиграфических исследованиях А.Я.Гольмшток обнаружил в толще осадков «кажущуюся отражающую границу». По аналогии с морскими и океаническими разрезами он интерпретировал ее как границу устойчивости газовых гидратов, насыщающих толщу осадков — зону их стабильности. В 2002 г. В.А.Голубев, основываясь на результатах изучения теплового потока через дно Байкала, также предположил их существование. Эти предвидения хорошо увязывались с известными на Байкале уже около 150 лет

находками нефтяных пленок и скоплений горючего газа подо льдом. В 1997 г. при проходке скважины по проекту «Байкал-бурение» в керне, поднятом с глубин 120 и 160 м, в донных осадках обнаружили кристаллы газогидрата.

Эти образования широко распространены в морях и океанах, но не в пресноводных водоемах. Исключительная глубина водной толщи озера, низкие температуры воды, достаточное количество органического вещества, захороненного в осадках, обеспечивают формирование в Байкале газовых гидратов метана. Эта особенность более других придает озеру сходство с океаном, позволяя называть Байкал «пресноводным океаном» [13]. В последовавших затем специальных экспедиционных работах российские и бельгийские исследователи установили, что зона стабильности газогидратов прерывается у разломов, по которым высокие газовые струи выходят в толщу воды. Локацией бокового обзора сотрудники ВНИИОкеанологии (Санкт-Петербург) над выходами газов на дне, на глубинах более 1300 м, обнаружили цепочки грязевых вулканов (рис.8).

Зимой сотрудники Лимнологического института с помощью грунтовых трубок, опущенных со льда, подняли слои газогидратов, залегающие в грязевых вулканах почти непосредственно под поверхностью дна [14].

Возникновение газогидратов тесно связано с диагенетическими процессами [12]. Например, согласно теоретическим расчетам, в Байкале не должно происходить диагенетического образования карбонатов. Тем не менее, недавно в осадках обнаружен аутигенный карбонат железа — сидерит, образующийся здесь так же, как и в морских отложениях, содержащих газогидраты.

Результаты комплексных исследований свидетельствуют, что в отложениях, включающих гидраты, доминируют метаногенные процессы. В осадках отмечаются повышенные концентрации бентосных организмов, пищевая цепь которых, по-видимому, базируется не на фотосинтетической, а на хемосинтетической первичной продукции [13]. В этой особенности также просматривается сходство с океаническими бассейнами.

С XVIII в. на Байкале известны природные выделения нефти. У восточного берега озера их начали интенсивно изучать с 1902 г., но лишь в последние годы обнаружены и изучены выходы байкальской нефти [15]. Она в виде битума иногда обнажается в береговых обрывах восточного побережья. На берегах озера встречается байкерит. Его изотопный состав ($\delta^{13}\text{C}$) идентичен составу байкальской нефти. В Среднем и Южном Байкале она поступает со дна на поверхность, образуя пятна вблизи восточного берега. Летом там часто появляются «гудроновые шарики» вязкой деградированной нефти. Зимой она скапливается подо льдом в узких трещинах в виде битуминозных пленок и включений.



Рис.8. Схема размещения газогидратных провинций, активных выходов метана, грязевых вулканов, нефтепроявлений [13, 15]: 1 — мелководные выходы газов; 2 — глубоководные выходы газов; 3 — грязевые вулканы; 4 — районы нефтепроявлений; 5 — области аккумуляции гидратов; 6 — район гидротермальной разгрузки.

В 2005 г. обнаружено мощное нефтепроявление в глубоководном Байкале. В Средне-Байкальской впадине у мыса Горевой Утес (см. рис.8) на поверхности воды площадью 1 км² наблюдались многочисленные пятна нефти диаметром до 1 м, а эхолотированием выявлен газовый факел высотой около 500 м. По возрастным оценкам, эта нефть образовалась в мелу — раннем миоцене, когда климат Прибайкалья приближался к влажному субтропическому. С позднего миоцена при семиаридном—аридном климате образование нефти, по-видимому, в основном прекратилось. Подтверждением тому служат находки нефтегазовых проявлений только в тех местах Байкальской впадины, где присутствуют древние позднемеловые—среднемиоценовые отложения (рис.8, 9). Это позволяет считать нефть и вмещающие ее породы одновозрастными образованиями.

Исследованы нефтепроявления в устье р.Стволовой (мощностью около 0.3 т в год), у мыса Толстый (до 2 т год), у мыса Горевой Утес (до 4 т в год). Источники этих нефтей — кайнозойские отложения [15], нефть же образовалась из органического вещества пресного водоема с существенной долей органического вещества высшей наземной растительности. Это свидетельствует об озерном или дельтовом происхождении меловых и более молодых материнских свит. Байкальская нефть, таким образом, качественно отличается от древних нефтей Сибирской платформы.

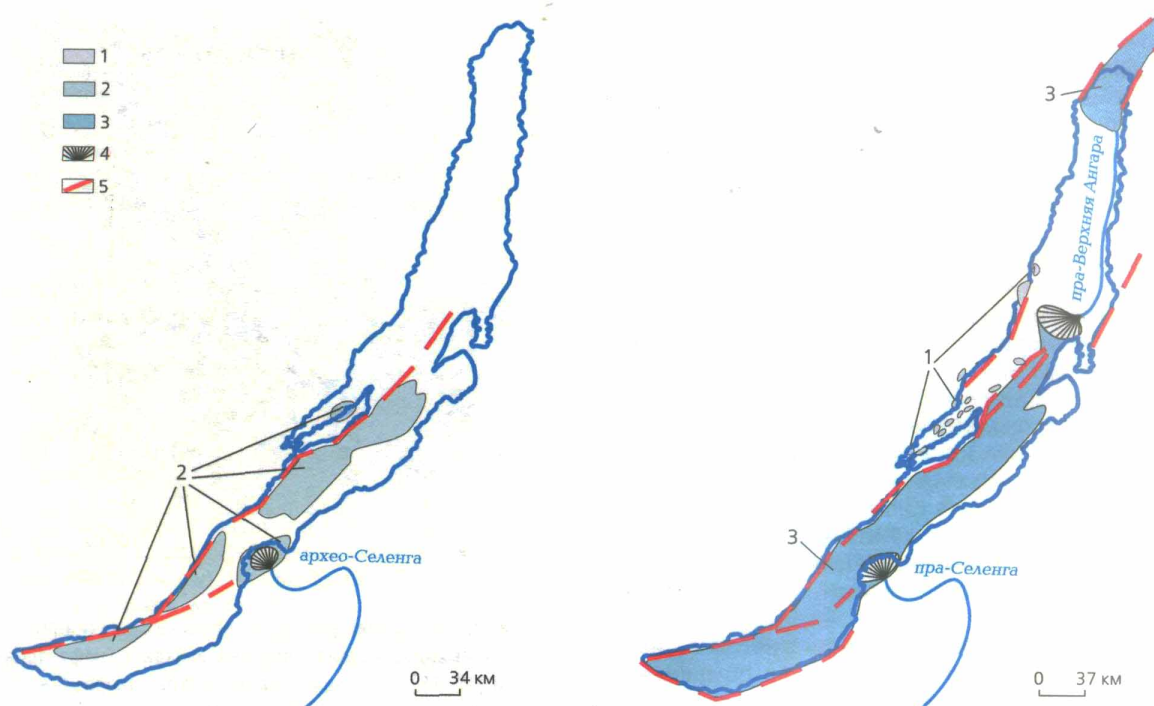


Рис.9. Бассейны осадконакопления в позднем мелу — среднем миоцене (70—10 млн лет назад) [16]. Слева — археобайкальский этап (маастрихт — ранний олигоцен, 70—30 млн лет назад); справа — протобайкальский этап, ранний подэтап (поздний олигоцен — средний миоцен, 30—10 млн лет назад). 1—3 — озера глубиной: 1 — несколько метров (местами переходящие в болота), 2 — несколько десятков метров, 3 — несколько сотен метров; 4 — дельты; 5 — основные разломы.

В районе мыса Горевой Утес с аппаратов «Мир» исследовались битумные постройки на дне [17]. Здесь обнаружили отдельно стоящий холм высотой до 10 м и диаметром 50 м. На его периферии наблюдались газовые факелы. Вблизи них встречались более мелкие постройки, иногда с вертикально стоящими на вершине трубками-«капельницами», через которые регулярно высачиваются капли нефти. В битуме из холма численность культивируемых микроорганизмов, окисляющих углеводород, почти в четыре раза выше, чем в прилегающих донных осадках. На образованиях, покрытых каплями нефти, отмечалось обилие различных глазом животных: более сотни на 1 м². Это на порядок выше плотности поселения на контрольных участках дна. Удивительно не только обилие животных в зоне разгрузки нефти, но и их принадлежность к распространенным в глубоководной зоне Байкала родам и видам. Вероятно, данное биологическое сообщество не зависит от поступления органического вещества, полученного за счет фотосинтеза. Источником пищи служат продукты жизнедеятельности разнообразных, обитающих здесь окисляющих углеводород микроорганизмов. Благодаря им экосистема озера эффективно справляется с естественным загрязнением воды углеводородами.

По объемно-статистическим оценкам, начальные геологические ресурсы в осадочных бассейнах Байкала составляют ~500 млн т углеводородов [15]. Хотя теоретически их промышленные скопления и могут быть найдены, ущерб озеру от поисковых, разведочных и эксплуатационных работ может стать невосполнимым. В настоящее время общепризнано, что осадочные бассейны в акватории Байкала — уникальная природная лаборатория современной генерации нефти и газа. Именно в этом заключается наибольшая ценность проводимых здесь исследований. Совместно с японскими учеными разрабатываются и апробируются методы добычи газовых гидратов — топлива будущего, ресурсы которого на планете огромны, но пока недоступны. В морях, а тем более в океанах, подобные исследования проводить практически невозможно.

Физико-химические процессы, протекающие в донных отложениях

Климат и глубина определяют некоторые особенности гидрологического режима Байкала. Конвективное перемешивание деятельного слоя (до 150—250 м) происходит здесь весной и зимой,

когда температура поверхности ниже, чем в глубинной зоне. Воды Байкала за счет течений регулярно обновляются. Это, наряду с низкой биологической продуктивностью, приводит к постоянному обогащению водной толщи до самого дна кислородом. Частицы взвеси, оседая здесь, интенсивно реминерализуются. Почти весь автохтонный органический углерод, биогенный кремний и другие потребляемые планктоном элементы растворяются, не достигая дна, и вновь включаются в круговорот. Например, вклад реминерализации в биологическое потребление фосфора в Байкале составляет 96%, а в океане — 99%, вклад диагенетической регенерации — 3%, а в океане — 1% [18]. Таким образом, в Байкале, как и в океане, реминерализация биологических частиц — основной процесс, обеспечивающий первичное продуцирование биогенных элементов. Диагенетическая регенерация осадков играет второстепенную роль.

По содержанию органического вещества в поверхностных осадках Байкал можно поставить в один ряд с морскими бассейнами и крупными озерами морского типа, тогда как во внутриконтинентальных пресноводных озерах концентрации органики значительно выше.

Насыщенность воды кислородом определяет окисленность поверхностного слоя осадков на большей части дна (что характерно для морей и океанов, но не для озер). Потому в Байкале развит океанический тип окислительно-восстановительного, или редокс профиля. Мощность образующегося окисленного слоя зависит от глубины проникновения кислорода в осадки, а черно-коричневый цвет — от присутствующих в нем оксидов железа и марганца. Граница между окисленными и восстановленными осадками определяется окислительно-восстановительной (или редокс) границей.

Скорость осадконакопления убывает от периферии к центру озера, и, как следствие, в том же направлении растут мощность окисленной зоны и редокс-потенциал верхнего слоя осадков, что, повторим, соответствует океаническому типу редокс профиля.

В окисленных отложениях Байкала интенсивно накапливаются оксиды Fe и Mn. Их диагенетическая дифференциация приводит к формированию вторичных корок, стяжений, конкреций. Эти процессы подобны тем, что протекают в морях и гемипелагических районах океана. Концентрации Fe и Mn в глубоководных железомарганцевых образованиях Байкала, а также уровень их обогащения марганцем и микроэлементами бывают сопоставимы с их концентрациями в океанических конкрециях.

В Байкале широко распространены реликтовые железомарганцевые микрозоны, образование которых может быть обусловлено и залповыми выбросами терригенного материала, и недостат-

ком активного органического вещества, подобно тому как это отмечено в океане. На Академическом хребте, который был вовлечен в область седиментации значительно позже остальной акватории и где минимальны скорости седиментации, нередко нестационарные диагенетические системы, аналогичные океаническим. В них из-за дефицита активного органического углерода, необходимого для редукционных процессов растворения и переотложения Fe и Mn, окислительный фронт продвигается в глубь осадка, где формируется слоистая текстура с двумя-тремя железомарганцевыми или марганцевыми прослоями. Развитая стадия окислительного диагенеза позволила применить к Байкалу модель распределения марганца в твердой и жидкой фазах осадков, предложенную для морских отложений [12].

Таким образом, процессы диагенетического перераспределения Fe и Mn в осадках Байкала аналогичны процессам в морях и гемипелагических районах океана. В то же время мощность окисленной зоны в озере при сравнительно высокой скорости осадконакопления невелика, и окисное рудообразование не находит своего завершения в его илах.

Расположение Байкала в зоне активного рифта накладывает свой отпечаток на многие протекающие здесь процессы, которые отражаются, в том числе, на составе жидкой фазы осадков. В поровых водах обнаружены разнообразные аномалии, обусловленные гидротермальными проявлениями на дне, наличием газовых гидратов, поступлением в отложения различных по происхождению и составу высокоминерализованных вод по зонам тектонических нарушений. В своей основе поровые воды — вадозные (блуждающие подземные воды атмосферного происхождения), однако к ним примешиваются и глубинные [19, 20].

Гидротермальные выходы на дне озера пока известны лишь в бухте Фролиха (Северный Байкал), но имеются предположения об их существовании и в других местах. В частности, об этом свидетельствует состав конкреции, найденной А.А.Бухаровым на глубоководном склоне о.Большой Ушканый. Слагающий ее псиломелан аналогичен псиломелану морских конкреций района активной гидротермальной деятельности. Но все-таки мощность гидротермальной разгрузки на Байкале слишком мала, чтобы влиять на состав огромной массы воды озера.

* * *

Таким образом, мы показали, что в донных отложениях Байкальской впадины протекают процессы, нетипичные для озер, но характерные для океанических систем. Расчеты современных скоростей раздвижения Байкальского рифта (около 4 мм/год) позволяют оценить временной интервал, который потребует (если процессы будут продолжаться с такой же интенсивностью) для

формирования нового океана [21]. Это время соизмеримо с возрастом Атлантического океана — 200 млн лет [7]. Если предполагаемый сценарий реализуется, то вновь образованный океан можно будет назвать Неоазиатским, по аналогии с некогда существовавшим на этой территории древним океаном — Палеоазиатским [22]. С образованием нового океана завершится полный цикл развития литосферы восточного сегмента Евразии: древние палеоконтинент Сибирь и позднедокембрийско—раннепалеозойский Палеоазиат-

ский океан, сейчас позднепалеозойско—современный Сибирско-Дальневосточный континент и Тихий океан, а в будущем — неоконтинент Сибирь и Неоазиатский океан.

Мы предполагаем определенный скептицизм по отношению к нашим прогнозам (легко прогнозировать развитие событий на такой срок) и не беремся утверждать, что все так и случится за 200 млн лет. Процесс может прерваться на любой стадии, но возможность такого развития событий нам представляется весьма вероятной. ■

Литература

1. Геология и геофизика: Спец. выпуск / Ред. М.И.Кузьмин. 2001. Т.42. №1—2.
2. Мац В.Д. Возраст и геодинамическая природа осадочного выполнения Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2012. Т.53. №9. С.1219—1244.
3. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск, 2001.
4. Павловский Е.В. Сравнительная тектоника мезозойских структур Восточной Сибири и Великого рифта Африки. М., 1948.
5. Флоренсов Н.А. Байкальская рифтовая зона и некоторые задачи ее изучения // Байкальский рифт. М., 1968. С.40—56.
6. Мац В.Д., Лобацкая Р.М., Хлыстов О.М. Механизм разрастания Байкальской впадины в ходе эволюции прибортовых морфоструктур // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на Земле. Материалы научно-практической конференции. Пос.Листвянка Иркутской обл., 18—20 марта 2008 г. / Отв. ред. О.Т.Русинек, В.А.Фиалков. Новосибирск, 2008. С.141—154.
7. Хаин В.Е., Михайлов А.Е. Общая геотектоника. М., 1985.
8. Лисицын А.П. Лавинная седиментация // Лавинная седиментация в океане. Ростов-на-Дону, 1982. С.3—27.
9. Хатчинсон Д.Р., Гольмшток А.Ю., Зоненшайн Л.П. и др. Особенности строения осадочной толщи озера Байкал по результатам многоканальной сейсмической съемки // Геология и геофизика. 1993. Т.34. №10—11. С.25—36.
10. Вологина Е.Г., Штурм М., Воробьева С.С. и др. Особенности осадконакопления в озере Байкал в голоцене // Геология и геофизика. 2003. Т.44. №5. С.407—421.
11. Голдырев Г.С. Осадкообразование и четвертичная история котловины Байкала. Новосибирск, 1982.
12. Гранина Л.З. Ранний диагенез донных осадков озера Байкал. Новосибирск, 2008.
13. Клеркс Я., Земская Т.И., Матвеева Т.В. и др. Гидраты метана в поверхностном слое глубоководных осадков оз.Байкал // Докл. АН. 2003. Т.393. №6. С.822—826.
14. Хлыстов О.М. Новые находки газовых гидратов в донных осадках озера Байкал // Геология и геофизика. 2006. Т.47. №8. С.979—981.
15. Которович А.Э., Каширцев В.А., Москвин В.И. и др. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. Т.48. №12. С.1346—1356.
16. Мац В.Д., Щербаков Д.Ю., Ефимова И.М. Позднемеловая—кайнозойская история Байкальской впадины и формирование ее уникального биоразнообразия // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2011. Т.19. №4. С.40—61.
17. Хлыстов О.М., Земская Т.И., Ситникова Т.Я. и др. Донные битумные постройки и населяющая их биота по данным обследования озера Байкал с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир» // Докл. АН. 2009. Т.428. №5. С.682—685.
18. Callender E., Granina L. Geochemical mass balances of major elements in Lake Baikal // Limnology and Oceanography. 1997. V.42. №1. P.148—155.
19. Гранина Л.З., Каллендер Е., Ломоносов И.С. и др. Аномалии состава поровых вод донных осадков Байкала // Геология и геофизика. 2001. Т.42. №1—2. С.362—372.
20. Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск, 1974.
21. Актуальные вопросы современной геодинамики Центральной Азии / Ред. К.Г.Леви, С.И.Шерман. Новосибирск, 2005.
22. Геодинамическая эволюция центрально-азиатского подвижного пояса: от океана к континенту // Геология и геофизика. 2007. Т.48. №1.