

Один ^{две} РИФТ — Модели

*Два геолога — три мнения
(народная мудрость)*

ПРОЛОГ

Отработав один полевой сезон в Танзании, мне довелось узнать забавную вещь о нас — российских геологах. По утверждению африканских коллег, на вопрос, как сформировалась та или иная структура, российский геолог мгновенно отвечает «не знаю», после чего переходит к подробному объяснению. Должен честно признаться, что не знаю ответа на вопрос «как образовался Байкальский рифт?», а раз так, то, следуя логике предыдущего высказывания, самое время перейти к рассмотрению этого вопроса.

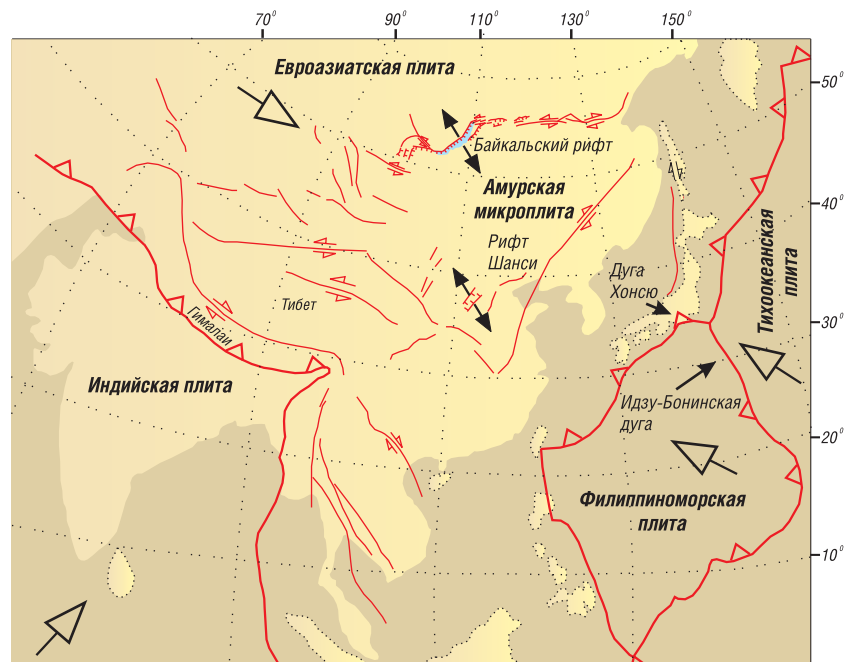
ОНИ БЫЛИ ПЕРВЫМИ

Первые геологические описания Байкала были проведены еще в XVIII веке. Так, в 1772 году российский академик, немец по происхождению, Петр Симон Паллас писал: «Байкал кажется свидетелем большой катастрофы; он местами неизмеримо глубок, имеет несколько утесов, подобных столбам, как вымурованным из глубины. Но в горах не находят, кроме нечастых и слабых землетрясений, никаких других разрушений ... ни разломов, ни следов вулканов, лав». Разломы и вулканы были обнаружены позднее, в следующем столетии (их детальное изучение позволило отнести Байкал к рифтовым структурам). Однако всерьез рифтовой тематикой заинтересовались только в середине XX века. Значительный вклад в изучение Байкальского рифта внесли сотрудники Института земной коры СО РАН, образовавшие научную школу по изучению континентального рифтогенеза.

В начале 70-х годов XX века широко развернулась дискуссия о причинах рифтогенеза. Этот спор коснулся и Байкальского рифта. Известные исследователи, американец Питер Молнар и француз Пол Таппонье, обратили внимание на связь столкновения Азиатской и Индийской плит с деформациями во внутренней части Азии. Они предположили, что этот механизм мог привести к «пассивному» растяжению в зоне Байкальского рифта. Такая точка зрения получила большую популярность за рубежом. Вера Александровна Рогожина и Владимир Михайлович Кожевников



ИВАНОВ Алексей Викторович — старший научный сотрудник Института земной коры СО РАН, кандидат геолого-минералогических наук. Изучением континентального рифтогенеза занимается с 1993 г. В настоящее время его исследования поддерживаются грантом президента РФ (МК1903.2003.05)



- Границы литосферных плит
- Направление движения литосферных плит
- Основные внутриконтинентальные разломы:
- a - сбросы,
- b - сдвиги,
- c - неопределенной кинематики
- Направление растяжения коры в Байкальском рифте и рифте Шанси

Структурное положение Байкальского рифта в рамках тектонической схемы Центральной Азии

СТРУКТУРА БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

Байкальская рифтовая система расположена во внутренней части континента и отделяет северную стабильную часть Евразийской плиты от другого крупного стабильного блока, называемого Амурской микроплитой. Рифтовая система состоит из серии впадин (крупнейшая из них — Байкальская) и разделяющих их поднятий, протягивающихся более чем на 1500 км, также включает в себя поля позднекайнозойского вулканизма, расположенные на некотором удалении от впадин и их горного обрамления.

Байкальская котловина состоит из двух самостоятельных впадин — Южнобайкальской и Северобайкальской, отделенных друг от друга Академическим подводным хребтом.

из Института земной коры по сейсмическим данным зафиксировали под Байкальским рифтом аномальное разуплотнение на подлитосферных глубинах, в так называемой верхней мантии Земли. Поэтому, российская сторона отстаивала точку зрения о главенствующей роли глубинных термальных процессов — то есть «активном» рифтогенезе. Эта многолетняя проблема о «пассивном» и «активном» механизме растяжения Байкальского рифта по-прежнему остается актуальной. Хотя в последнее время все больше и больше исследователей приходят к мысли об одновременном действии обоих механизмов. Автором не навязывается какое-либо определенное мнение о механизмах образования Байкальского рифта. Вместо этого приводятся новые и, на мой субъективный взгляд, наиболее важные данные о тектонике, вулканизме, осадконакоплении и глубинном строении. Интерпретация этих данных зачастую остается неоднозначной.



Академик Николай Алексеевич Логачев перед портретом своего учителя член-корр. РАН Николая Александровича Флоренсова (осень 2002 г. Фото В. Короткоручко)

Научная школа по изучению континентального рифтогенеза в Институте земной коры СО РАН (г. Иркутск)

Основателями научной школы стали геологи Николай Александрович Флоренсов и Виктор Прокопьевич Солоненко, а также геофизик Андрей Алексеевич Тресков. Ими были заложены основы систематического изучения Байкальского рифта. В своей автобиографии (апрель, 1984) Н. А. Флоренсов писал: «В моей докторской диссертации оказались смешанными элементы угольной геологии, молодого вулканизма, главное же — элементы позднекайнозойской и кайнозойской тектоники Прибайкалья и Забайкалья. Ранее ..., я искал здесь отличия от типичных африканских рифтов, но затем оказалось, что между теми и другими имеется явное сходство. К счастью, моя ошибка осталась просто при мне, а сводка, данная в диссертации и затем в монографии, ... послужила отправной точкой для широких и многолетних исследований по рифтовой тематике...». После ухода Николая Александровича, эстафету перенял его ближайший соратник и ученик, академик Николай Алексеевич Логачев. Николай Александрович Флоренсов был основателем Института земной коры СО РАН (до 1962 г. — Институт геологии Восточно-Сибирского филиала Академии наук СССР) и его первым директором. В период руководства Николаем Алексеевичем Логачевым (1976—1998 гг.) рифтовая тематика принесла Институту широкую, в том числе и международную, известность. Исследования в этом направлении и поныне ведутся их учениками и коллегами.

Литература

Мордвинова В. В., Винник Л. П., Косарев Г. Л., Орешин С. И., Треусов А. В. Телесеismicкая томография в Центральной Азии по волнам Р и РКР // Напряженно-деформированное состояние и сейсмичность литосферы. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003.

Логачев Н. А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2003. — Т. 44. — № 5.

Рассказов С. В., Логачев Н. А., Брандт И. С., Брандт С. Б., Иванов А. В. Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя: (Южная Сибирь — Южная и Восточная Азия). — Новосибирск: Изд-во «Наука», 2000.

Рассказов С. В., Саранина Е. В., Демонтерова Е. И., Масловская М. Н., Иванов А. В. Мантийные компоненты позднекайнозойских вулканических пород Восточного Саяна по изотопам Pb, Sr и Nd // Геология и геофизика, 2002. — Т. 43. — № 12.

Саньков В. А., Лухнев А. В., Мирошниченко А. И., Леви К. Г., Ашурков С. В., Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г., Кале Э., Девершер Ж., Верноль М., Бехтур Б., Амаржаргал Ш. Современные движения земной коры Монголо-Сибирского региона по данным GPS-геодезии // Доклады Академии Наук, 2003. — Т. 392. — № 6.

Хориучи К., Гольдберг Е. Л., Мацузаки Х., Кобаяши К., Шибата Я. Проверка магнитостратиграфических шкал миоценовых осадков озера Байкал // Геология и геофизика, 2004. — Т. 45. — № 3.

Ярмолук В. В., Иванов В. Г., Коваленко В. И., Покровский Б. Г. Магматизм и геодинамика Южно-Байкальской вулканической области (горячей точки мантии) по результатам геохронологических, геохимических и изотопных (Sr, Nd, O) исследований // Петрология, 2003/ — Т. 11. — № 1.

Barry T. L., Saunders A. D., Kempton P. D., Windley B. F., Pringle M. S., Dorjnamjaa D., Saandar S. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Mongolia: evidence for the role of asthenospheric versus metasomatized lithospheric mantle sources // Journal of Petrology, 2003. — V. 44.

Litasov K. D., Taniguchi H., Mantle evolution beneath Baikal rift. — Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University, Japan, CNEAS Monograph Series, 2002. — V. 5.

Zorin Yu. A., Turutanov E. Kh., Mordvinova V. V., Kozhevnikov V. M., Yanovskaya T. B., Treusov A. V. The Baikal rift zone: the effect of mantle plumes on older structure // Tectonophysics, 2003. — V. 371.

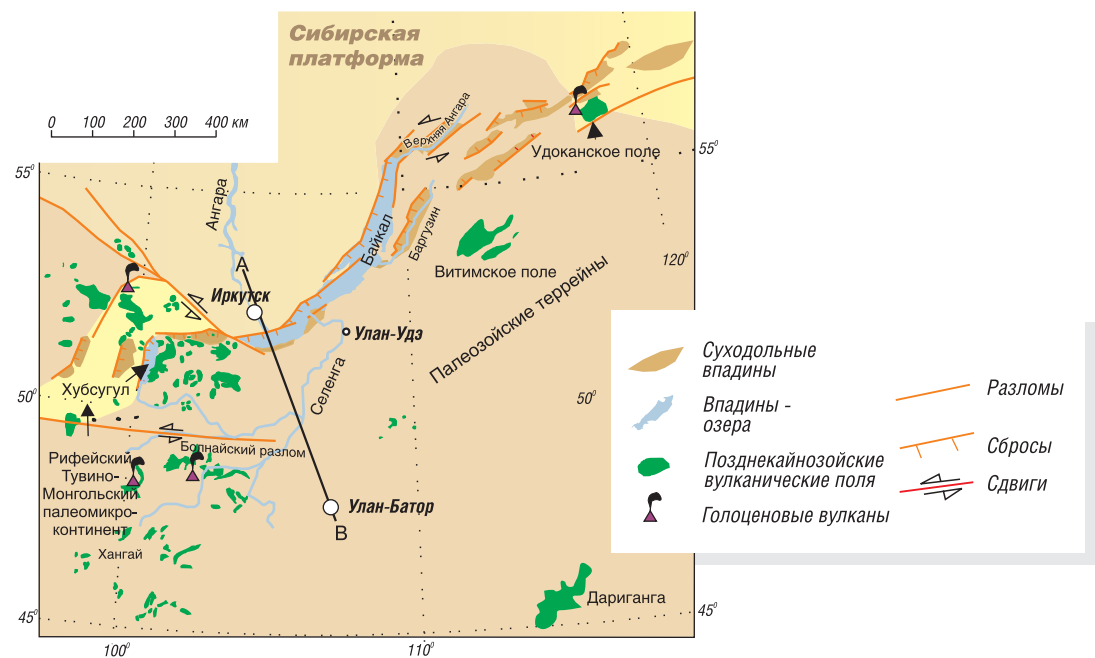
ВОЗРАСТ ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ

Количество рыхлых осадков в Байкальской котловине оценивается в 75 тыс. км³, что составляет примерно 70 % осадочных отложений впадин всей рифтовой системы (Логачев, 2003). Южнобайкальская впадина считается наиболее древней. В 1970-х Николай Алексеевич Логачев и Николай Александрович Флоренсов предположили, что ее образование началось в позднем эоцене – раннем олигоцене, примерно 30–35 млн лет назад. С тех пор традиционно это значение фигурирует в большинстве публикаций о Байкальском рифте. В последние годы Николай Алексеевич Логачев отмечал, что на самом деле впадина может быть гораздо древнее.



Баржа с буровой вышкой, пробивается сквозь торосы на пути к Академическому хребту (Фото М. Митичкина)

Структура Байкальской рифтовой системы и распределение позднекайнозойских вулканических полей. Линия АВ — разрез, показанный на с. 58



Определение времени начала впадинообразования затруднено. Для того чтобы получить ответ на этот вопрос, нужно добраться до пород, погребенных под многокилометровой осадочной толщей. В рамках международного проекта «Байкал-бурение» в байкальских осадках было пробурено несколько скважин в зимние периоды 1996–1998 гг. с вмороженных в лед барж. Наиболее длинная возрастная летопись была получена при бурении осадков на Академическом хребте, поскольку этот участок дна Байкала удален от всех береговых источников сноса вещества и поэтому характеризуется наименьшей скоростью осадконакопления. Было определено, что возраст осадков в основании выбуренного осадочного керна длиной 585 м составляет примерно 8,3 млн лет (Хориучи и др., 2004). Это минимальный доказанный возраст озера Байкал.

Согласно последним данным скорость осадконакопления в последние 4,5 млн лет на Академическом хребте составляла в среднем около 0,04 мм в год, тогда как раньше она была в среднем около 0,1 мм в год (там же). То есть скорость осадконакопления уменьшилась более чем в два раза! Это неожиданный результат, так как традиционно по данным изучения изменчивости осадочного разреза суходольных впадин Байкальского рифта выделялись стадии «медленного» олигоцен-миоценового и «быстрого» плиоцен-четвертичного рифтогенеза.

Иными словами, зафиксированная смена скорости осадконакопления является прямо противоположной ожидаемой. Единственным объяснением этого факта, на мой взгляд, может быть существенное воздымание Академического подводного хребта на рубеже 5–4 млн лет назад, что привело к его изоляции от терригенного материала, привносимого, главным образом, реками Селенга, Баргузин и Верхняя Ангара.



Малое море (фото В. Короткоручко)

СОВРЕМЕННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ БЛОКОВ

Скорость расширения Байкальской котловины оставалась до недавнего времени предметом серьезного спора. Вопрос оказался решенным благодаря использованию спутниковых систем навигации — *GPS*. По десятилетним наблюдениям с помощью постоянных и временных *GPS* пунктов удалось узнать, что скорость раздвижения стабильных блоков Сибирской платформы и Амурской микроплиты составляет 4 мм в год. При этом все деформации локализуются вдоль осевой части Байкальского рифта.

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ

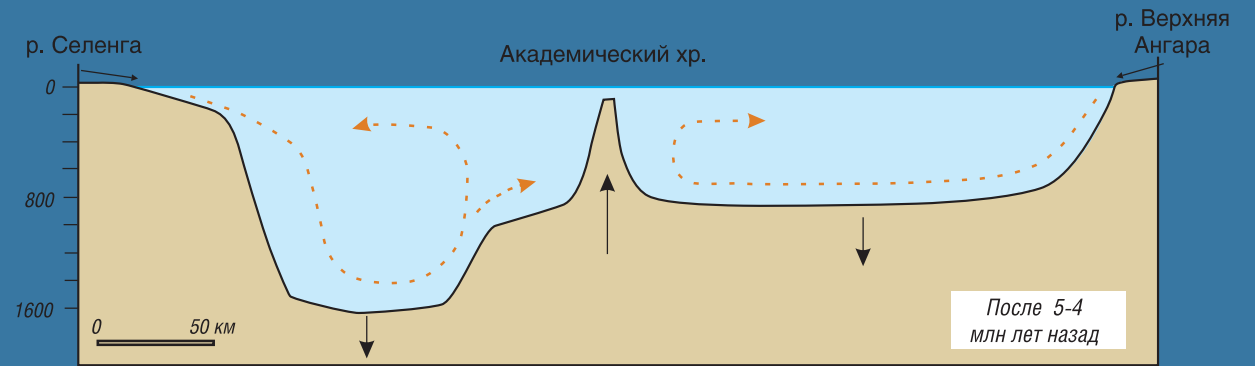
Важную роль в понимании процессов рифтогенеза играют геофизические методы исследования, позволяющие «увидеть» современную глубинную структуру коры и мантии. По данным сейсмической томографии, осуществленной в ходе российско-американского эксперимента в 1992 году, был построен скоростной разрез прохождения Р-волн (Мордвинова и др., 2003). Обнаружено, что одна низкоскоростная аномалия находится практически под Байкалом. Однако вторая располагается гораздо южнее, под территорией Монголии, там, где какое-либо растяжение коры отсутствует.

Возникает резонный вопрос: что же вызывает понижение скоростей прохождения сейсмических волн в мантии — повышенная температура или особенности состава вещества? Обычно принимается первое объяснение (Zorin et al., 2003).

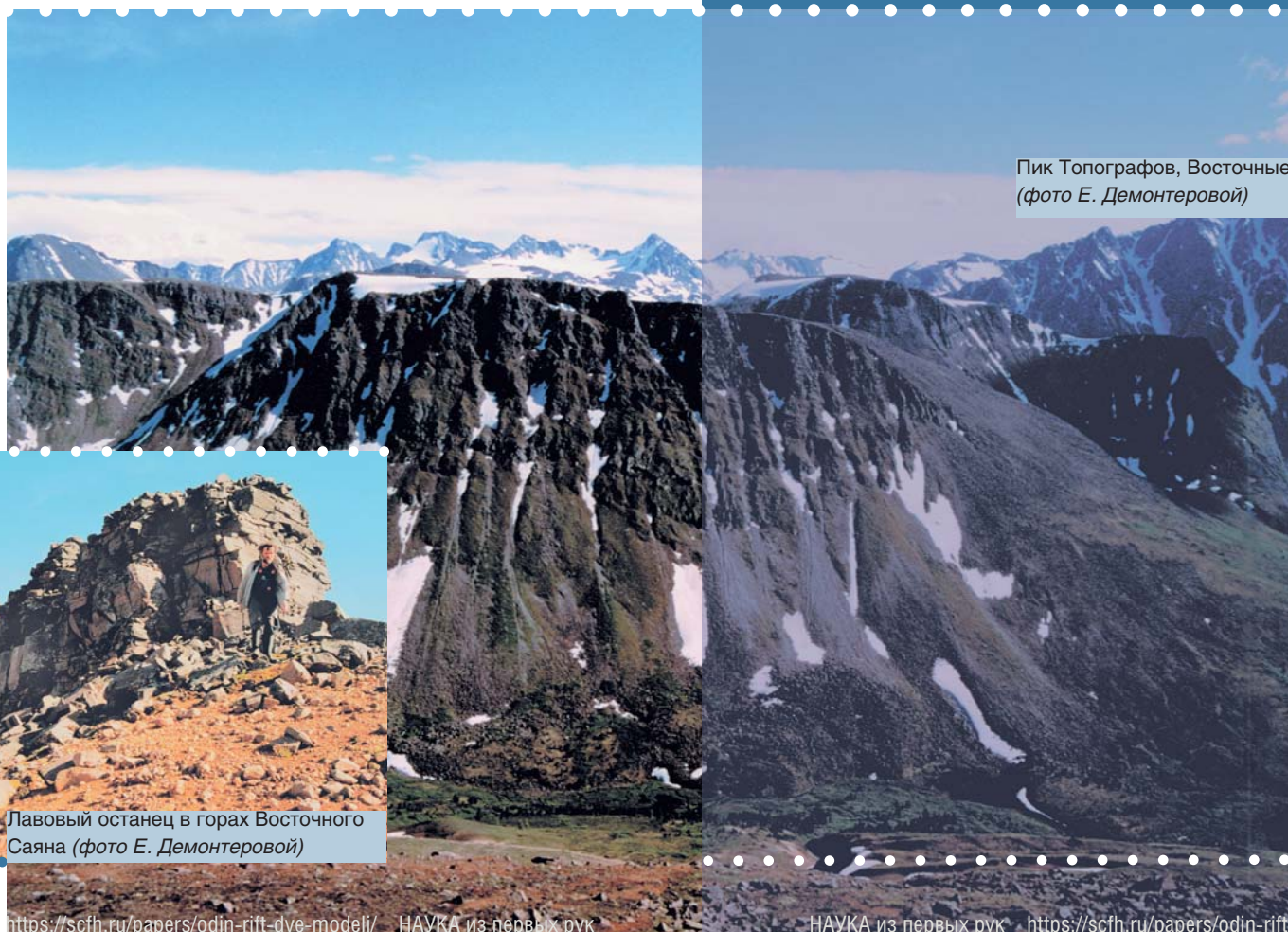
ЭВОЛЮЦИЯ ГЛУБИННОГО ТЕРМАЛЬНОГО РЕЖИМА ЛИТОСФЕРЫ

Частичные выплавки из мантии щелочных базальтоидов по пути к поверхности иногда захватывают фрагменты окружающих пород. Находки таких пород, называемых *ксенолитами*, являются весьма ценными для познания вещественного состава и условий «жизни» земных глубин. В Байкальском рифте наибольший «урожай» мантийных ксенолитов был собран в восточной части Витимского вулканического поля Игорем Викторовичем Ащепковым и его коллегами из Объединенного института геологии, геофизики и минералогии СО РАН.

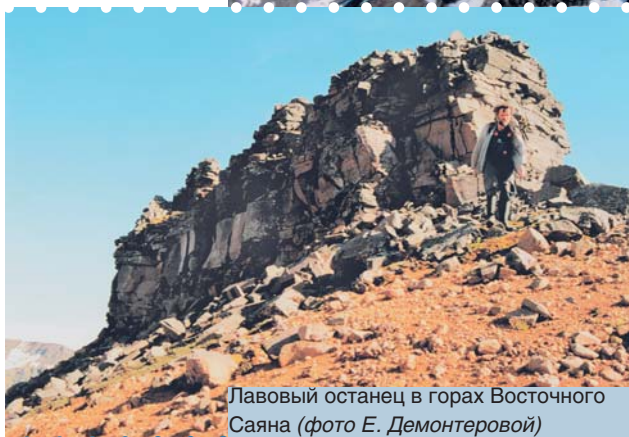
Оказалось, что мантийные ксенолиты из миоценовых лав Витимского поля указывают на большой диапазон давлений, а произошли они из больших глубин, из молодых четвертичных лав — меньшим диапазоном. Это указывает на большую толщину литосферы в миоцене под Витимским полем, в сравнении с четвертичным временем. По расчетам, утонение литосферы за 13 млн лет составило примерно 15 км. При этом граница между



Смена режима осадконакопления на подводном Академическом хребте из-за его воздымания 5-4 млн лет назад



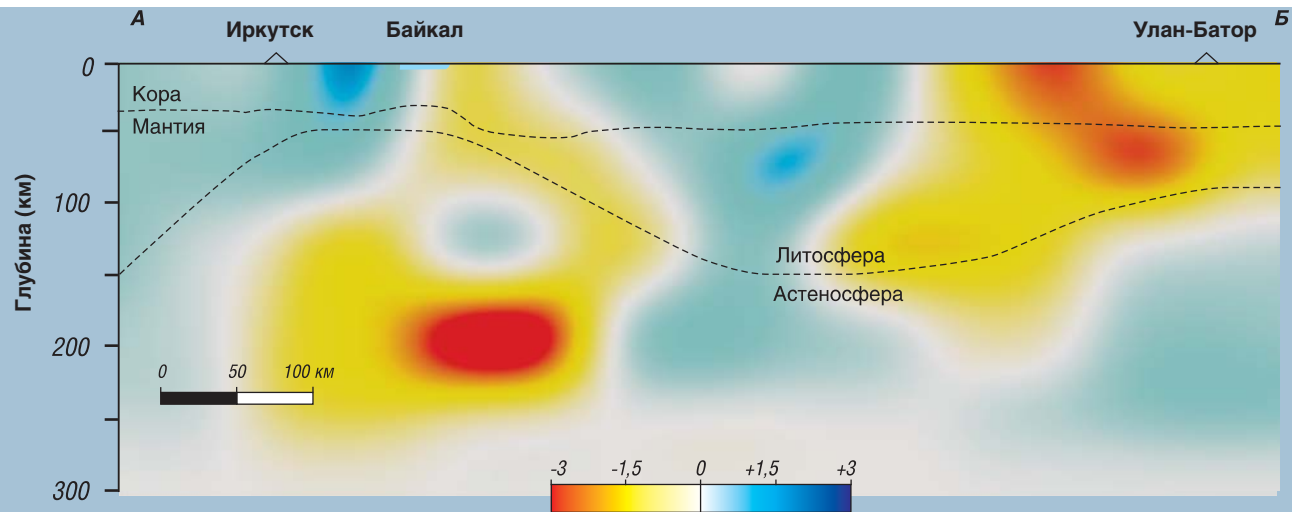
Пик Топографов, Восточные Саяны (фото Е. Демонтеровой)



Лавовый останец в горах Восточного Саяна (фото Е. Демонтеровой)

уровнями образования минералов-индикаторов, гранатов и шпинелей углубилась примерно на 8 км, что согласно экспериментальным данным указывает на повышение температуры.

Отметим еще одну интересную особенность. Несмотря на значительное утонение литосферы под Витимским полем, сколь либо существенного растяжения коры не происходило. Согласно данным бурения, заполненные осадками впадины под лавами не превышают в ширину первые десятки километров, а в глубину — первые сотни метров (Рассказов и др., 2000).



Скоростной разрез коры и мантии. Разным цветом показаны относительные изменения скоростей прохождения Р-волн (Мордвинова и др., 2003). Мощность коры и литосферы по данным (Zorin et al. 1989; 2003)

ВУЛКАНИЗМ

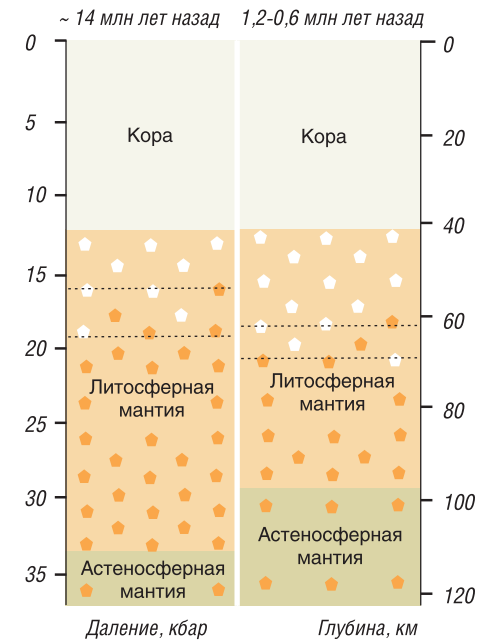
При определении возраста вулканических пород Байкальского рифта была установлена сложная миграция вулканизма в Восточном Саяне и на Удоканском хребте. В обоих районах вулканизм со временем смещался по замысловатым траекториям с преобладающим западным трендом, т. е. практически в противоположную сторону от общего движения Евразийской литосферной плиты. Это, вероятно, указывает на тектонический контроль подъема магм в области сочленения структур сжатия и растяжения, при этом общее смещение вулканизма в западном направлении согласуется с существованием в астеносфере относительно неподвижного горячего источника магм.

Для того чтобы в мантии появился частичный расплав необходимо либо поднять ее температуру, либо снизить давление, или же насытить мантию летучими компонентами. При пассивном рифтогенезе со скоростью 5 мм в год, а также при такой толщине литосферы и коры, как в Байкальском рифте, давление в мантии никогда не снизится настолько, чтобы мантийные породы начали плавиться при отсутствии летучих компонентов. Однако если в мантии имеются легкоплавкие участки с водосодержащими минералами или карбонатами, то такие участки даже при незначительных перепадах температуры и давления будут переходить в расплав.

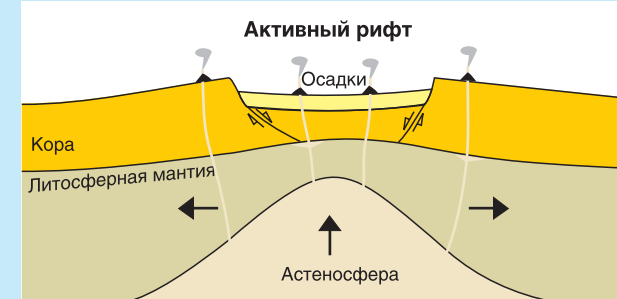
Характерно, что распределение вулканических полей не тяготеет ни к рифтовым впадинам, ни к гравитационным минимумам — областям потенциального повышения тепла. Особо показателен пример с вулканическим плато Дариганга в Монголии. По-видимому, это указывает на то, что плавление мантии Байкальского рифта

и сопредельных территорий контролируется, в первую очередь, ее составом.

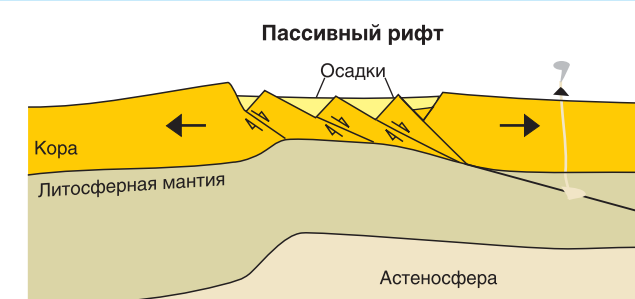
Для выяснения состава плавящейся мантии изучаются изотопные отношения элементов. Отношения изотопов неодима и стронция $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, измеренные в лавах юго-западной части Байкальского рифта, в сопоставлении с составами лав хребта Хангай показали, что область плавления мантии можно разделить на три части (произвольно обозначенных как компоненты А, В и С). Компонент А относится к области подлитосферной мантии (астеносфере), а два других компонента характеризуют неоднородную литосферную мантию. Причем, компонент В может относиться к более глубоким частям гранат-содержащей мантии, а компонент С — к шпинель-содержащей мантии или области кора-мантийного перехода.



Петрологический разрез миоценовой и четвертичной литосферной мантии под восточной частью Витимского вулканического поля. Строение мантии показано по данным (Litasov, Taniguchi, 2002), а возраст — по данным (Рассказов и др., 2000). Белые и розовые пятигранники означают, соответственно, присутствие в лерцолите шпинели и граната. Пунктиром показан диапазон глубин, где эти минералы встречаются одновременно



Существуют две крайние модели растяжения литосферы во внутриконтинентальных областях, называемые моделями «активного» и «пассивного» рифтогенеза. Движущей силой «активного» рифтогенеза является источник тепла восходящего мантийного потока, обычно называемого **плюмом**. При этом допускается, что область зарождения таких плюмов может находиться на разделе верхней и нижней мантии на глубине 650 км или даже на границе с ядром на глубине 2700 км. Основными характеристиками «активного» рифтогенеза считают формирование тектонических впадин на фоне крупного регионального поднятия, повышенный тепловой поток и широко распространенный вулканизм. Последний должен предшествовать и формированию регионального поднятия, и впадинообразованию. Преобладающий состав вулканических пород «активного» рифта должен проявляться на большой территории



Схематическое представление о строении литосферы «активного» и «пассивного» рифтов

и не зависят от состава и возраста литосферы. В модели «пассивного» рифтогенеза основной причиной растяжения считают тектонические напряжения, возникающие на границах литосферных плит на значительном удалении от области растяжения. Фиксируемое воздымание подлитосферной мантии пассивно следует утонению литосферы. Характеристикой «пассивных» рифтов считают приуроченность всех рифтовых структур древним границам между литосферными блоками разного возраста и слабо проявленный вулканизм. При этом растяжение предшествует вулканизму, а вулканические породы отражают неоднородный состав литосферы.

КОРЕЛЯЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

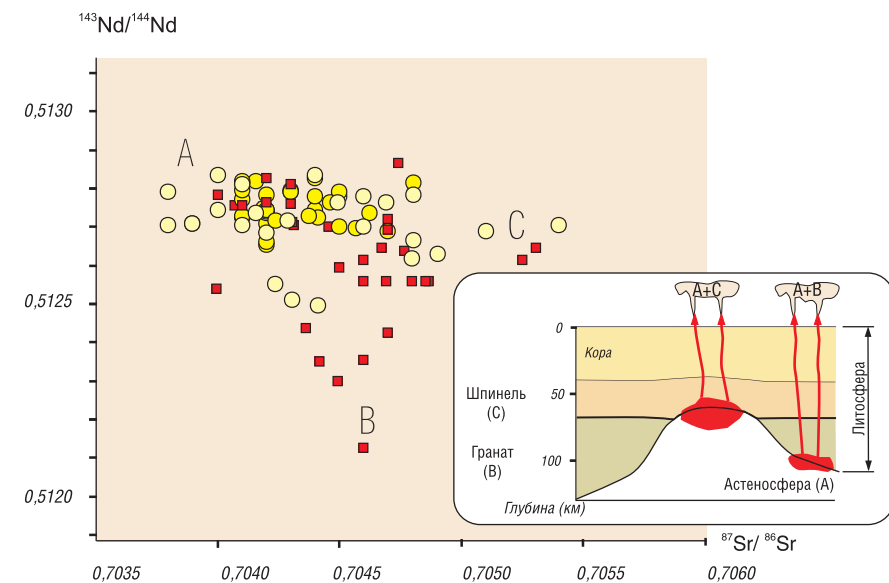
Только лишь коровые напряжения от зоны Индо-Азиатской коллизии или местные источники тепла в мантии не могли привести к образованию Байкальского рифта. В последние годы также стала обсуждаться идея о важной роли взаимодействия литосферных плит на восточной окраине Евразии.

Обращает на себя внимание, что эпизоды сжатия и растяжения в зонах столкновения Индо-Азиатских и Тихоокеано-Азиатских плит смещены относительно друг друга по времени. Если сжатие воздействовало на южную окраину Центральной Азии, то в это время на ее восточной окраине существовал режим растяжения. И, наоборот, во время существенного сжатия, возникшего на восточной окраине, южная окраина испытывала эпизод релаксации.

Такая динамика сжатия и растяжения могла «раскачивать» внутренние части Центральной Азии, приводить к смещению блоков, что при их геометрии формировало зоны сжатия и растяжения на границах этих блоков. При таком механизме

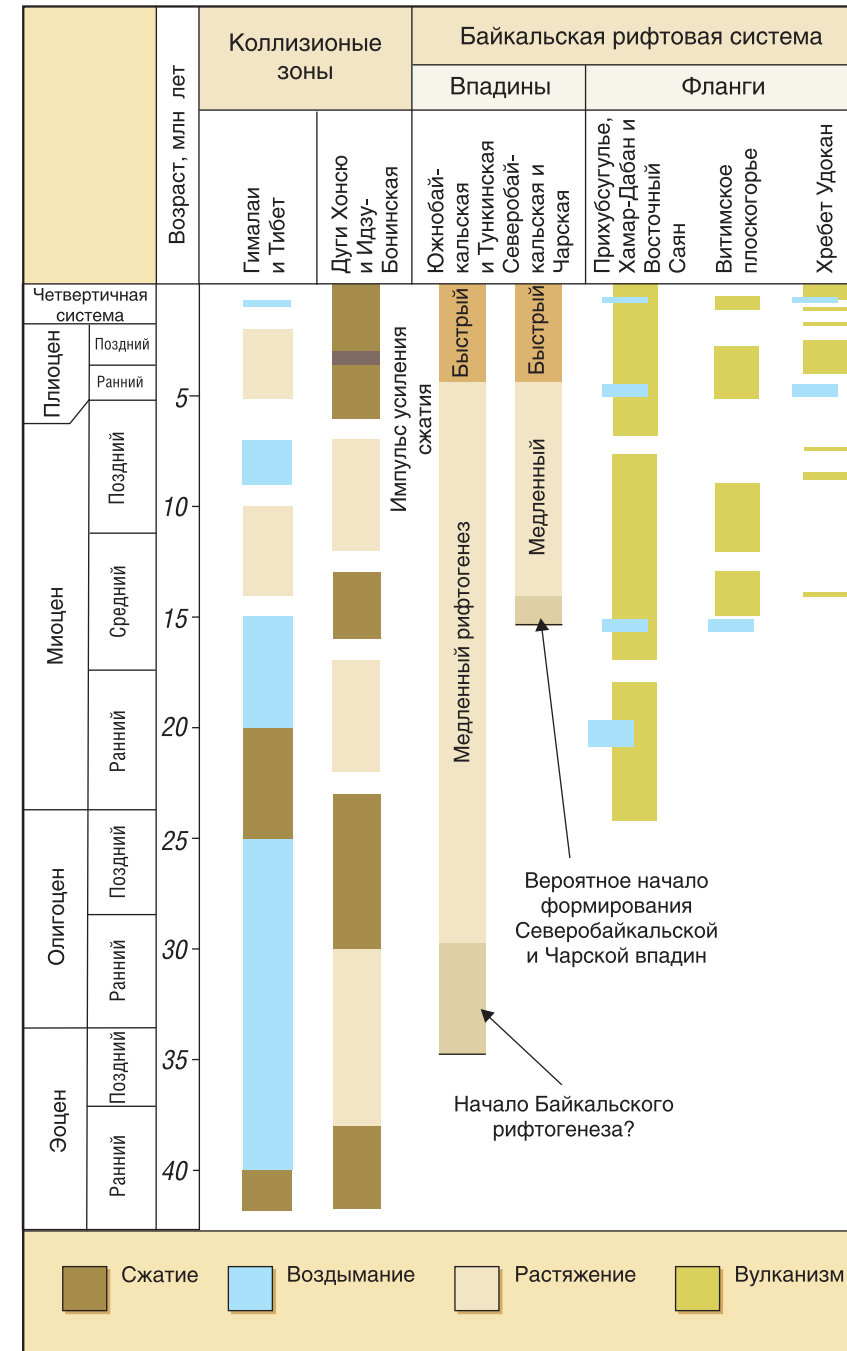
следует ожидать, что импульсы основных тектонических событий в Центральной Азии (например, импульсы вращения Амурской микроплиты) будут совпадать по времени со сменой тектонического режима на границах литосферных плит. К сожалению, датирование таких импульсов по-прежнему остается сложной задачей.

Для Байкальского рифта периоды воздымания могут быть оценены по данным изучения положения датированных лав в рельефе (Рассказов и др., 1998). Всего было выявлено четыре таких эпизода: 21–19, 16–15, 5–4 и около 0,8 млн лет назад. Интересно, что смена скорости осадконакопления на подводном Академическом хребте, произошедшая 5–4 млн лет назад, совпала с одним из таких эпизодов воздымания. Как отмечалось раньше, это событие может маркировать начало стадии «быстрого» рифтогенеза. В это время во фронте Индо-Азиатской коллизии существовал режим растяжения, а сжатие на восточной окраине Центральной Азии началось чуть раньше этого эпизода. Таким образом, стадия «быстрого» рифтогенеза не может быть генетически связана с удаленными тектоническими событиями во фронте Индо-Азиатской коллизии. Она связана либо с тектоническими событиями на восточной границе Азии, либо с термальным и/или химическим воздействием на литосферу за счет местных мантийных источников тепла.



■ Базальты Хангая
○ Базальты Байкальского рифта

Вариации изотопных отношений стронция и неодима в позднекайнозойских лавах юго-западной части Байкальского рифта (Рассказов и др., 2002; Ярмолюк и др., 2003; Vargy et al., 2003). На врезке показана возможная интерпретация данных



Тектонические события в зонах Индо-Азиатской и Тихоокеано-Азиатской коллизий в сопоставлении с тектоническими и вулканическими событиями в Байкальском рифте

ЭПИЛОГ

Так какой же все-таки Байкальский рифт — «активный» или «пассивный»?

Коровые деформации и растяжение, в основном, контролируются удаленными тектоническими событиями, происходящими на границах литосферных плит. Разогрев же, плавление и утонение литосферы осуществляются за счет глубинных источников тепла, или благодаря существованию в мантии легкоплавких областей. Это означает, что Байкальский рифт несет в себе черты как «активного», так и «пассивного» рифтогенеза.

Пытаясь рассмотреть развитие Байкальского рифта исключительно с позиций изучения коровых деформаций или эволюции вулканизма, или глубинной геофизики, мы оказываемся в положении слепых мудрецов, изучающих слона на ощупь в известной притче. Только интеграция различных направлений исследований позволит нам дать ответ, какой из механизмов рифтогенеза преобладал, менялось ли их соотношение во времени, связаны ли процессы растяжения коры и магмообразования или это два независимых процесса. Необходимость объединения своих усилий сегодня осознается практически всеми исследователями, а это означает, что когда-нибудь, начиная статью о Байкальском рифте, можно будет сказать «мы знаем, как и почему он образовался».