

## Первоначальное обоснование и последующее восприятие гипотез о строении и развитии Байкальской системы впадин

С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, И.С. Чувашова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск

**Аннотация.** История развития представлений о строении и развитии Байкальской системы поднятий и впадин и ее важнейших структурных элементов условно разделяется на этапы выдвижения: 1) начальных гипотез, появившихся до 1960-х гг., 2) основных гипотез, связанных с большим объемом работ, выполненных в связи с разработкой проблемы рифтогенеза на территории юга Восточной Сибири в 1960–1990-х гг., и 3) новейших гипотез, в основу которых легли факты, полученные благодаря использованию новых подходов, реализованных в геологических исследованиях 2000–2020-х гг.

**Ключевые слова:** кайнозой, Байкал, Байкальская рифтовая зона, Байкальская рифтовая система, Японско-Байкальский геодинамический коридор, Азия, рифтогенез.

## Initial substantiation and subsequent perception of hypotheses on structure and development of the Baikal system of basins

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, I.S. Chuvashova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk

**Abstract.** The history of getting ideas on the structure and development of the Baikal system of basins and its most important structural elements is conventionally divided into stages of putting forward: 1) initial hypotheses that appeared before the 1960s, 2) numerous hypotheses associated with a large amount of work performed in connection with the development of the rifting problems in the south of Eastern Siberia in the 1960–1990s, and 3) latest hypotheses that resulted from new facts obtained through new approaches implemented in geological studies of the 2000–2020s.

**Keywords:** Cenozoic, Baikal, Baikal rift zone, Baikal rift system, Japan-Baikal geodynamic corridor, Asia, rifting.

К 160-летию В.А. Обручева.

### Введение

Геологическая гипотеза порождается фактами, которые геолог получает в экспедициях с последующей камеральной обработкой собранных материалов. Если цель исследований поставлена по-новому и правильно подобраны методы исследований для ее достижения, гипотеза действительно приобретает новый смысл. С течением времени, по-

являются новые факты и новые подходы, способствующие уточнению принятой гипотезы или ее замене новой гипотезой, лучше объясняющей полученные данные.

На юге Восточной Сибири находится весьма выразительная новейшая геологическая структура, обозначенная на земной поверхности Байкальской системой впадин с глубокими озерами Байкал и Хубсугул. Система впадин в виде единой новейшей

структуры была впервые трассирована Н.А. Флоренсовым (1948) и Е.В. Павловским (1948а,б). Кем и когда проводились последующие исследования впадин? Кто впервые выдвинул ту или иную гипотезу о характере развития этой системы? На каких фактах основывались вновь появившиеся гипотезы? Какой смысл в них вкладывался изначально?

В настоящей статье представлены оценки гипотез, выдвигавшихся при изучении Байкальской системы впадин несколькими поколениями геологов. В суждениях об образовании впадины оз. Байкал и пространственно связанной с ней Байкальской системы сухоходных впадин используются термины, обоснованные и принятые в оригинальной трактовке авторов первых публикаций о тех или иных геологических феноменах. Зачастую, в последующих работах авторы, не знакомые с логикой современников новых разработок, вносили искаженное понимание прежде принятых терминов.

Цель обзора – обозначить публикации, в которых впервые ставился и решался вопрос о происхождении Байкальской системы впадин или ее важнейших структурных элементов с формулировкой новой гипотезы. В рассмотрении вовлекаются наиболее заметные гипотезы с оценкой их восприятия, сложившейся к настоящему времени через последующие работы, составившие «основной поток геологии».

### ***Начальные гипотезы***

Начальные основополагающие гипотезы были выдвинуты: 1) о единой эволюции структуры Байкальской впадины в мезозое и кайнозое (1948 г.), 2) об определении Восточно-Сибирского рампа или свода (1948 г.), и 3) об унаследованном развитии впадин оз. Байкал от структуры докайнозойского фундамента (1968 г.).

#### ***Единая эволюция структуры Байкальской впадины в мезозое и кайнозое***

В 1772 г. П.С. Паллас, наблюдая «утесы конгломератов на западном берегу озера, пришел к убеждению, что котловина Байкала представляет собой громадную трещину, разделившую горы и заполнившуюся водой», а позднее, в 1871–1874 гг. А.Л. Чека-

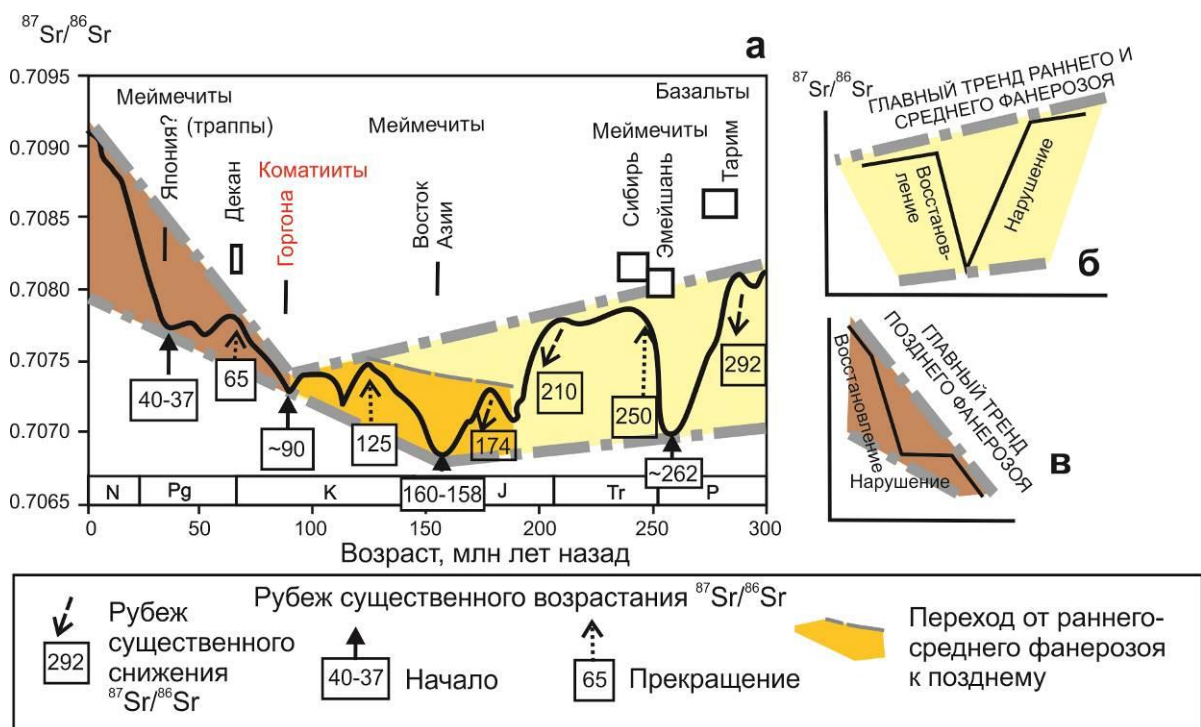
новский тоже изложил «взгляд на происхождение Байкала как громадной трещины в юрской формации» (Флоренсов, 1960, с. 5). Как видим, термин «трещина» был впервые применен для обозначения впадины оз. Байкал на русском языке на 122 года раньше, чем для обозначения термином “rift” на английском языке сброса, образовавшегося под влиянием гравитационных сил и ограничивающего рифтовую долину в Восточной Африке (Gregory, 1984).

Хотя в отчетах П.С. Палласа и А.Л. Чекановского юрские отложения и кайнозойская впадина оз. Байкал оказались как будто случайно связанными между собой, в последующих работах по югу Восточной Сибири действительно предполагалось неразрывное развитие мезозойских и кайнозойских структур (Павловский, 1948а,б). Соответственно, осадочные и вулканические комплексы мезозоя и кайнозоя этой территории представлялись в единой совокупности пород (Флоренсов, 1960; Белов, 1963). Из анализа распределения в рельефе вулкано-генных и осадочных формаций Прибайкалья и Забайкалья следовал вывод «об исключительной локализации кайнозойских впадин в Прибайкалье, о том, что последние как бы вложены, «втиснуты» в гораздо более широкое и ровное мезозойское тектоническое поле» (Флоренсов, 1960, с. 189).

С начала 1960-х гг. появились работы с новыми представлениями о геологическом развитии юга Сибири в мезозое и кайнозое. При углубленном изучении пространственно-временного распределения осадочных формаций была установлена смена направленности развития тектонической структуры Прибайкалья и Забайкалья от среднего мела к позднему мелу и палеогену (Логачев, 1974; Скобло и др., 2001; Рассказов и др., 2007) с резкой сменой состава вулканических пород и характера вулканизма около 100–90 млн лет назад (Рассказов, 1993). Комплексный анализ данных, полученных позже, показал, что от этого рубежа начался новейший геодинамический этап, который привел к современному состоянию коры и мантии в глобальном и региональном (азиатском) выражении (Рассказов, Чувашова, 2013; Rasskazov, Chuvashova, 2017).

Заметим, что направленный процесс распада Пангеи предполагает единое развитие океанов в мезозое и кайнозое, в последние 240 млн лет (Le Pichon et al., 2019). Однако развитие континентов отличалось от развития океанов. Влияние континентальной тектоники отразилось в характере геологического развития Земли как космического тела и запечатлено в различных геологических фактах, например, в смене направленности Sr-изотопного тренда в воде океанов около 90 млн лет назад. Тенденция снижения отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в водах Мирового океана в течение раннего и среднего палеозоя свиде-

тельствует о снижении роли фактора размыва континентов и возрастании роли фактора вовлечения в экзогенную переработку мантийного материала, поступавшего в зонах спрединга океанического дна. Вклад океанического компонента в переходный временной интервал от раннего-среднего фанерозоя к позднему фанерозою отражается в среднеюрском (160–158 млн лет) абсолютном минимуме отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в водах Мирового океана. Начиная с 90 млн лет назад, поверхность континентов стала разрушаться сильнее (рис. 1).



**Рис. 1.** Главные тренды вариаций  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в морской воде раннего-среднего и позднего фанерозоя (Чувашова и др., 2017). На панели (а) изгиб верхней огибающей (конвергентной) линии тренда около 90 млн лет назад соответствует начальной точке отсчета новейшего глобального геодинамического этапа. Изгиб нижней огибающей (дивергентной) линии тренда около 160 млн лет назад означает предшествующую глобальную структурную перестройку, маркированную океаническими событиями. Врезки (б) и (в) иллюстрируют нисходящий и восходящий характер главного тренда континентальных событий. Использована линия морских записей из работ (McArthur et al., 2001, 2012).

**Fig. 1.** The main sea water trend of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variations in the Early-Middle and Late Phanerozoic (Chuvashova et al., 2017). (a) – bending the upper envelope (convergent) line of the trend at ca. 90 Ma corresponds to the initial reference point of the latest global geodynamic stage. Bending of the lower envelope (divergent) line at ca. 160 Ma means the preceded global structural reorganization, marked by oceanic events. Inserts (b) and (c) illustrate descending and ascending parts of the main trend of continental events. The line of marine records is adopted after McArthur et al. (2001, 2012).

Сейчас вряд ли можно считать оправданным утверждение о том, что структурное развитие коры юга Восточной Сибири в мезозое и кайнозое было однонаправленным. В

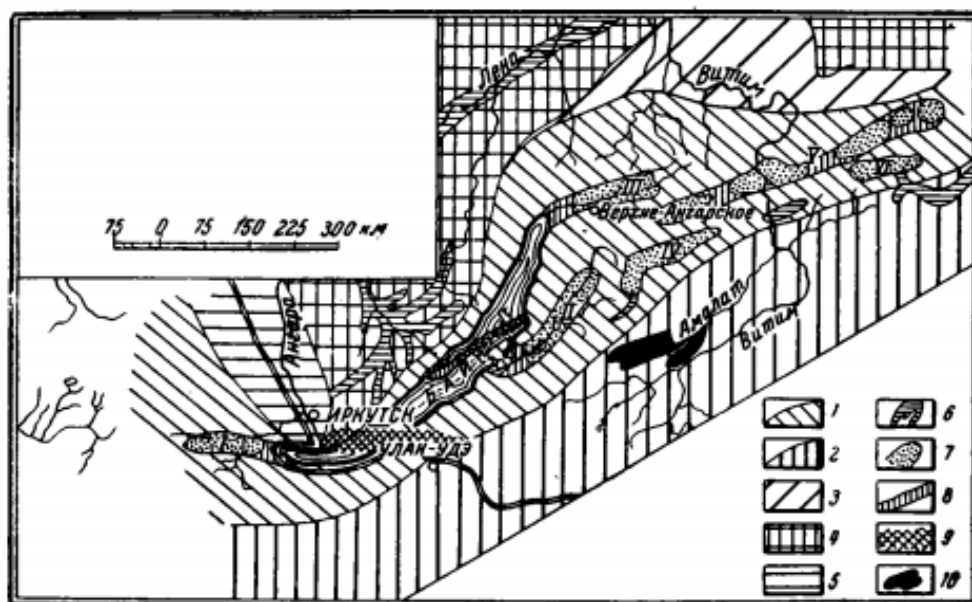
южно-байкальском ядре будущей Байкальской системы поднятий и впадин в мезозое существовал ороген, который сохранялся в виде остаточного Южно-Байкальского под-

нения в позднем мелу и палеогене (т.е. в начале и середине новейшего геодинамического этапа) с развитием предгорных прогибов (Предбайкальского и Селенгино-Витимского). Структуры коры, образовавшиеся в результате мезозойского тектогенеза, были существенно преобразованы к концу новейшего геодинамического этапа тектоническими процессами, получившими выражение в оформлении Байкальской системы впадин.

**Определение Восточно-Сибирского рампа или свода**

Первый (почти завершённый) образ структуры Байкальской системы впадин (системы поднятий и впадин) был намечен Е.В. Павловским по рельефу земной поверхности (1948а, с. 116–117): «На юго-запад от Байкальской впадины, составляя непосредственное ее продолжение, располагаются в неточном порядке впадины более мелкого масштаба – Тункинская, Торская и др. На севере происходит как бы раздвоение впадины Байкала на две ветви — Баргузинскую и Северо-Байкальскую, протягивающиеся далеко вверх по течению рр. Баргузина и

Верхней Ангары. К северо-востоку от Баргузинской впадины расположена довольно значительная по размерам впадина, занятая верхним течением р. Ципи и оз. Баунт. Между Ципинской и Верхне-Ангарской впадинами, отделяясь от них горными перемычками, располагается сравнительно небольшая впадина, занятая верхним течением р. Муи и левого притока р. Витима. Эта впадина является крайним западным членом целой системы депрессий, объединяемых под общим названием Муйско-Чарской впадины, наиболее крупной после Байкала. В состав обширной Муйско-Чарской впадины входят, помимо упомянутой впадины в верховьях р. Муи, еще впадина низовья р. Муи и р. Конды, обширная Верхне-Чарская впадина и Токкинская (в верховьях р. Токко, крупного правого притока р. Чары). Все эти впадины, разъединенные лишь междугорными перемычками, располагаются в четочном порядке и в совокупности слагают крупную Муйско-Чарскую впадину. К югу от Верхне-Чарской впадины расположена довольно крупная отрицательная форма рельефа — Верхне-Каларская впадина...



**Рис. 2.** Схема Восточно-Сибирского рампа. 1 – сводовое поднятие Станового хребта; 2 – зона развития мелких рамповых структур; 3 – окраинная зона Патомского нагорья – область интенсивных колебательных движений в кайнозое; 4 – Приленская плоская возвышенность – область медленного общего поднятия; 5 – Иркутский угленосный бассейн – впадина предгорного типа; 6 – древние долины; 7 – впадины байкальской системы: I – система южных впадин (Тункинская и др.), II – Баргузинская, III – Верхне-Ангарская, IV – Щитинская, V – Муйско-Чарская, VI – Каларская; 8 – междугорные пе-



ремычки, на Байкале частью подводные; 9 – зона мезозойского «поперечного синклинала»; 10 – главное поле развития покровных базальтов. Рис. 22 из монографии Е.В. Павловского (1948а).

**Fig. 2.** Scheme of the East Siberian ramp. 1 – arched rise of the Stanovoy Range; 2 – zone of development of small ramp structures; 3 – marginal zone of the Patom Highlands – an area of intense oscillatory movements in the Cenozoic; 4 – Prilensky flat upland – an area of slow general uplift; 5 – Irkutsk coal basin – foothill-type depression; 6 – ancient valleys; 7 – depressions of the Baikal system: I – system of southern depressions (Tunka and others), II – Barguzin, III – Verkhnyaya Angara, IV – Shchitin, V – Muya-Chara, VI – Kalar; 8 – intermountain bridges, partly underwater on Lake Baikal; 9 – zone of the Mesozoic “transverse syncline”; 10 – the main field of basaltic cover. Fig. 22 from the monograph by E.V. Pavlovsky (1948a).

Вдоль краев описываемой системы впадин тянутся в виде двух параллельных хребтов альпийские горные цепи, достигающие абсолютной высоты 1800–2000 м, а местами даже 2500–2800 м... система впадин, которую мы будем называть Байкальской системой, всюду сопровождается высокогорными массивами альпийского типа, вытянутыми вдоль впадин и вплотную примыкающими к ним со всех сторон... Высокогорная зона, тесно связанная с системой впадин, в общем повторяет контуры последней. В плане зона высокогорья имеет вид полосы, изогнутой в виде пологого S и вытянутой в общем с юго-запада на северо-восток. Ширина этой зоны выражается в 150—200 км. Длина ее, равная длине Байкальской системы впадин, может быть оценена примерно в 2000 км» (рис. 2).

Далее «...формирование впадин байкальского типа целесообразнее связывать не с расширением земной коры, не с возникновением разрывов типа нормальных сбросов и не с опусканием узкой и длинной полосы под влиянием силы тяжести. Скорее эти наблюдения свидетельствуют в пользу теории сжатия, под влиянием которого началось вспучивание огромного валоподобного Станового хребта, сопровождавшееся сколами земной коры в замковой части свода. Эти сколы, как можно думать, по типу относятся к разрывам надвигового типа – одной из форм проявления складкообразовательного процесса. Нужно думать, что надвиги, по которым обе части свода надвигались на центральную полосу, были ориентированы навстречу друг другу, что по поверхностям скольжения их обе части разорванного свода двигались навстречу друг другу» (с. 120).

Логика механизма образования структуры поднятий и впадин приводит Е.В. Павловского к выводу о развитии орогенеза. «Свод Станового хребта можно рассматривать как крупную складку антиклинального типа — мегаантиклинал. Его своеобразие заключается в том, что он, обладая признаками обычной структуры складчатого типа, выражен на поверхности. Формирование этого своеобразного мегаантиклинала явилось настоящим горообразующим процессом, приведшим в конечном счете к появлению высокогорного Станового хребта» (с. 122).

Идея о сходстве впадины оз. Байкал с впадиной оз. Таньганьика первоначально высказывалась А.В. Львовым. Е.В. Павловским предложены другие варианты сравнения Байкальской системы впадин с подобными структурами земной поверхности. «В поисках структур, аналогичных впадинам Байкальской системы и обрамлению их Становым хребтом, внимание останавливается на близких явлениях, сравнительно давно известных под именем рифтовых или рамповых долин на побережье Средиземного моря, в Палестине и на востоке Африканского континента.» (с. 123). «И в Африке, как и в Аравии, так же, как и в Восточной Сибири, формированию сводов и полос опускания предшествовала эпоха формирования зрелого рельефа, или, местами, пенеплена. Последующий этап – вспучивание свода – создает совершенно новые условия существования речной сети, приспособляющейся к новым условиям рельефа поверхности. И в Африке, и в Байкальской зоне на фоне развития сводового поднятия образуются узкие полосовидные зоны опускания. Формирование этих

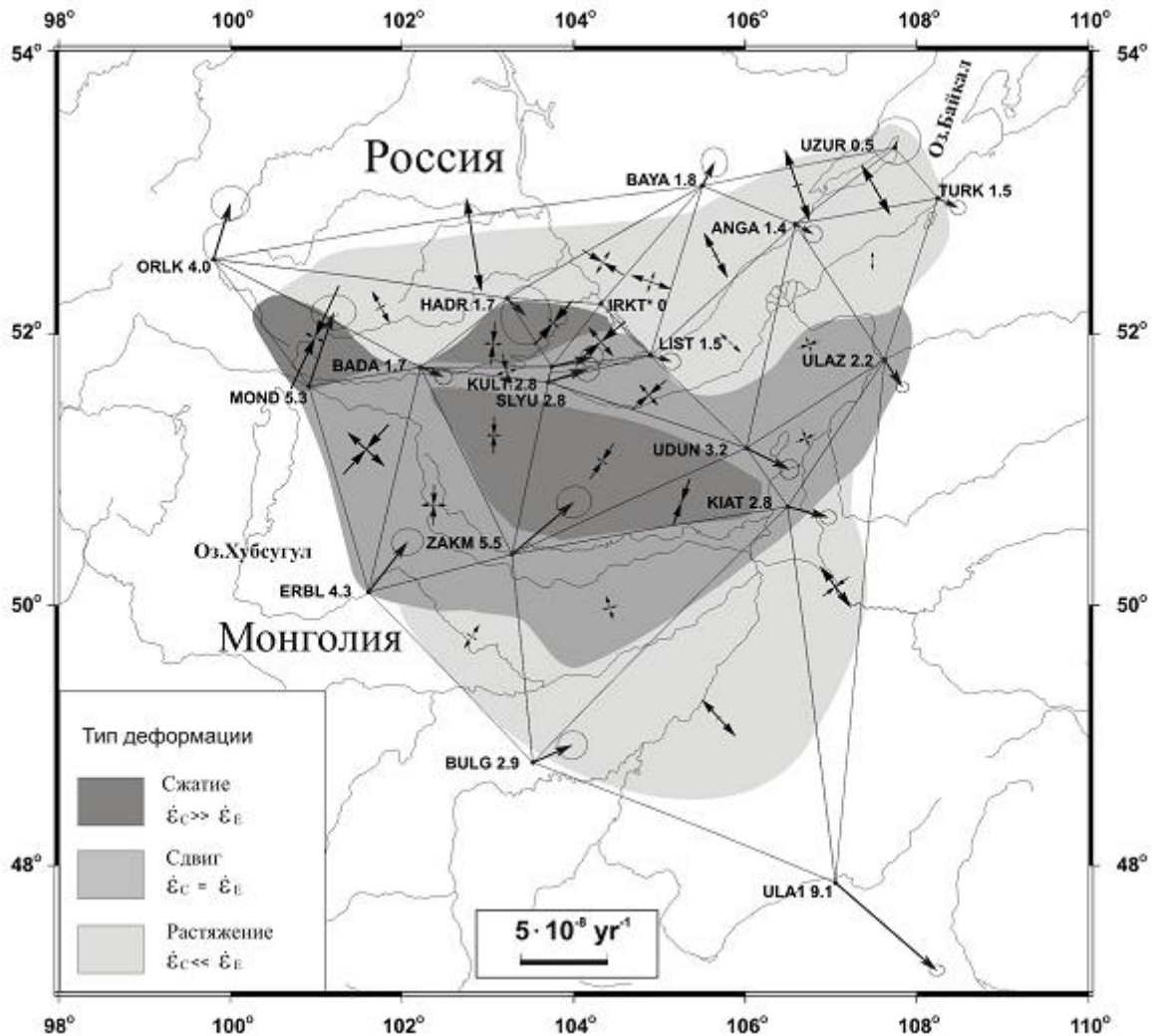
последних является сложным процессом, связанным с образованием диагональных перемычек внутри впадин. Впадины в некоторых частях начинают служить водоемами для крупных озер. Эти последние, в свою очередь, оказывают определенное ориентирующее влияние на прилегающую речную систему, служа для нее местным базисом эрозии. Формирование свода и узких полос опускания в Африке, так же, как и в Восточной Сибири, является процессом, не завершенным до настоящего времени. И Байкальская система, и Великий Африканский рифт представляют собой области частых землетрясений. По окраинам впадин располагаются горячие ключи и газовые источники. На периферии сводового поднятия проявляется мощная эффузивная деятельность, как это мы видели, например, в Трансиордании. Совершенно аналогичное явление характерно и для Байкальской системы» (с. 125). «Поразительно также, что время образования полос опускания и в Африке, и в Сибири одно – третичный и четвертичный периоды вплоть до настоящего момента... Механизм образования и природа узких полос опускания представляются до самого последнего времени дискуссионными вопросами. В споре теорий рифта и рампы последний начинает, по-видимому, приобретать главенствующее значение» (Здесь же).

В другой работе этого же года Е.В. Павловский (1948б) рассматривает рельеф обширной территории юга Восточной Сибири и Дальнего Востока с обозначением Байкальского сводового поднятия, Селенгино-Витимского синклинория, Даурского свода и Шилкинского синклинория. С одной стороны, он вновь подчеркивает сходство структур юга Восточной Сибири с рифтовыми долинами Восточной Африки и района Мертвого моря, с другой стороны, делает вывод о неприменимости к структурам юга Восточной Сибири теории рифта и рампы, предлагая рассматривать происхождение этих структур в результате особых процессов аркогенеза и тафрогенеза.

Идея Е.В. Павловского о существенной роли сжатия коры на юге Восточной Сибири в мезозое и кайнозое не получила конкретного обсуждения в последующих работах Н.А. Флоренсова (1960) и Н.А. Логачева (1977), поскольку для структуры БРЗ этими авторами была принята гипотеза рифтогенеза (тафрогенеза). Между тем в БРЗ установлены надвиги, отражающие сжатие верхней части коры (Ружич и др., 1972; Рассказов, 1990; Аль Хамуд и др., 2021). По гравиметрическим данным моделировалась утолщенная кора под хребтом и утоненная кора под впадиной (устное сообщение Ю.А. Зорина). Такие соотношения подтвердились моделью сейсмической томографии на профиле Тункинской долины и хр. Хамар-Дабан (Мордвинова и др., 2017).

Дополнительную аргументацию в пользу сочетания растяжения и сжатия в Байкальской системе поднятий и впадин вносят данные GPS-геодезии. Пространственное распределение преобладающих типов горизонтальных деформаций коры в поле современных горизонтальных деформаций территории Южного Прибайкалья и Северной Монголии отвечает зональной смене условий растяжения, сдвига и сжатия в направлении северо-запад – юго-восток (рис. 3). Впадины и понижения в региональном рельефе соответствуют областям растяжения и сдвига. Области преобладающего укорочения земной коры пространственно тяготеют к поднятиям (Лухнев и др., 2003).

Изучение разрезов осадочных отложений на Танхойской тектонической ступени Южного Байкала, выполненное в последние годы, показало, что после накопления осадочной толщи эоцена–начала плиоцена в спокойных тектонических условиях, в начале плиоцена активизировались сдвиговые смещения со сжатием. В районе Мишихи сдвиг по субширотному разлому сопровождался образованием лежачей складки, в верхнем крыле которой древние слои находятся выше молодых слоев (Аль Хамуд и др., 2021).



**Рис. 3.** Поле скоростей современных горизонтальных движений и деформаций южного обрамления Сибирской платформы по данным измерений на Байкальском и Монгольском GPS-полигонах за 1994–2001 гг. Векторы скорости смещений пунктов относительно ИРКТ показаны с эллипсами 95%-ного доверительного интервала. Рядом с пунктами наблюдений указаны аббревиатуры их названий и значения скорости движений в мм/год (Лухнев и др., 2003).

**Fig. 3.** The field of recent horizontal movement velocities and deformation rates of the southern surroundings of the Siberian platform, according to measurement data on the Baikal and Mongolia GPS testing areas for 1994–2001. Velocity vectors of sites relative to IRKT (Irkutsk) are shown with ellipses of the 95 percent confidence. At the measurement sites, name abbreviations and velocity rates (mm/year) are given after (Lukhnev et al., 2003).

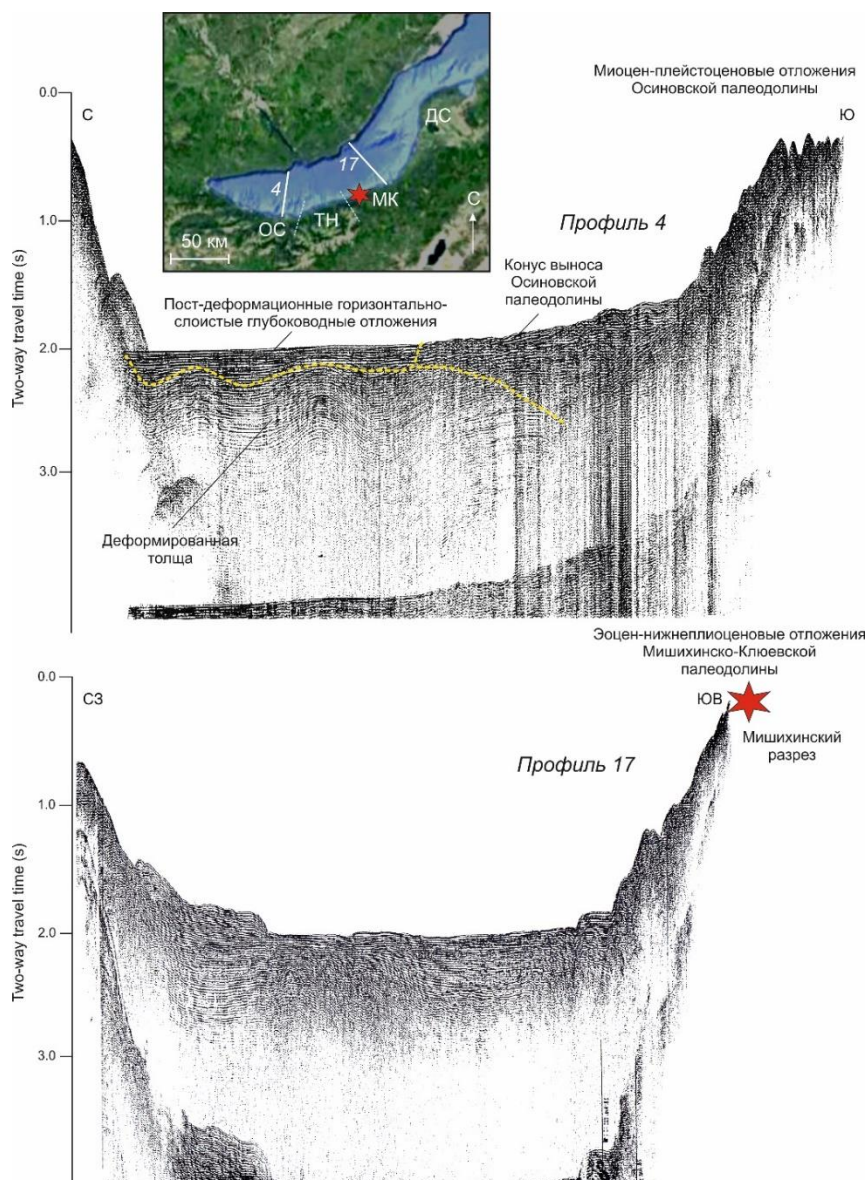
На рис. 4 показаны представительные сейсмические профили 4 и 17 осадочного наполнения Южно-Байкальской впадины, пространственно соответствующие Осиновской и Мишихинско-Клюевской палеодолинам южного побережья Байкала (Расказов и др., 2014). На профиле 4 отчетливо различаются две толщи донных отложений: нижняя, складчатая и верхняя, горизонтально-слоистая. Верхняя толща смещена к северному борту впадины. У южного борта гори-

зонтальная слоистость отсутствует, и поверхность дна несколько поднимается. Такое строение профиля, закономерно отражающее асимметрию впадины байкальского типа (на которую впервые обратил внимание А.Л. Чекановский), предполагает интенсивное поступление осадочного материала в озеро преимущественно с южного борта впадины. Ритмично-слоистый материал, представлен в низах разреза донных отложений и в северной, и в южной частях озера.



В верхах разреза донных отложений южной части впадины слоистость становится неотчетливой, что свидетельствует о латеральной смене ритмичных осадков неслоистым материалом авандельты Осиновской па-

леодолины. После складчатых деформаций такой же неслоистый материал продолжал накапливаться в южной части впадины одновременно с накоплением глубоководных осадков в ее северной части.



**Рис. 4.** Представительные сейсмические профили 4 (а) и 17 (б) осадочного наполнения Южно-Байкальской впадины (Логачев и др., 1996; Levi et al., 1997). Местоположение профилей показано на врезке в. На южном берегу Байкала профилям 4 и 17 пространственно соответствует распространение аллювиальных отложений Осиновской (ОС) и Мишихинско-Клюевской (МК) палеодолин, разделенных Танхойским блоком (ТН) с болотно-старичными отложениями. Стратоны разреза отложений Мишихинско-Клюевской палеодолины и Танхойского блока коррелируются со стратонами разреза, вскрытого скважинами в дельте р. Селенга (ДС).

**Fig. 4.** Representative seismic profiles 4 (a) and 17 (b) of the sedimentary filling of the South Baikal basin (Logatchev et al., 1996; Levi et al., 1997). The profile location is shown in inset c. On the southern shore of Lake Baikal, profiles 4 and 17 spatially correspond to the distribution of alluvial sediments of the Osinovka (OC) and Mishikha-Klyuevka (MK) paleovalleys, separated by the Tankhoi block (TH) with swamp-oxbow sediments. Strata of the sedimentary section in the Mishikha-Klyuevka paleovalley and the Tankhoi block correlate with those in the section studied by wells in the Selenga delta (DC).



Выявленная смена однонаправленного развития структуры от эоцена до начала плиоцена с последующим проявлением транспрессии коры может свидетельствовать в пользу кратковременного появления «сжатия, под влиянием которого началось вспучивание огромного валоподобного Станового хребта, сопровождавшееся сколами земной коры в замковой части свода» (Павловский, 1948; с. 120). Сжатие коры, выявленное на Танхойской тектонической ступени, действительно предшествовало росту хр. Хамар-Дабан, сопровождавшемуся накоплением во впадинах молассоидов аносской свиты верхнего плиоцена-эоплейстоцена.

Имеются факты, отражающие более поздние структурные перестройки в БРЗ. В северной (привпадинной) части Удоканского вулканического поля такая перестройка выразилась в резкой смене ориентировки даек одновременно со сменой состава магматических расплавов около 2.5 млн лет назад (Расказов, Чувашова, 2018). В осевой части хр. Удокан, в зоне голоценового вулканизма, было установлено изменение простирания трещинных магмовыводящих каналов с северо-западного на северо-восточное, произошедшее около 9–5 тыс. лет назад. Вулканизм Удоканского поля последних 15 тыс. лет контролировался структурами северо-восточной части Байкальской рифтовой системы и западной части Олекмо-Становой орогенной системы. Предполагается, что начало юного вулканизма было сопряжено с импульсом северо-западного сжатия верхней части коры в Олекмо-Становой системе, а затухание вулканизма произошло при ослаблении сжатия и переходе к преобладающему северо-западному растяжению коры, характерному для Байкальской рифтовой системы (Расказов, 1999). Перестройки, сопровождавшиеся проявлением сжатия коры, происходили в БРС с квазипериодичностью 2.5 млн лет: около 5–4 млн лет назад, около 2.5 млн лет назад и 9–5 тыс. лет назад. Эта квазипериодичность соответствует великим циклам эксцентриситета и, следовательно, может быть обусловлена орбитальным вращением Земли.

Мы приходим к выводу, что первоначальная идея Е.В. Павловского о проявлении сжатия коры при образовании впадины оз. Байкал не лишена оснований. Принимая во внимание импульсный характер развития вулканизма, пространственно связанного с Байкальской системой впадин в позднем кайнозое, мы предполагаем, что тектонические усилия растяжения и сжатия верхней части коры регулировали вулканические импульсы. Кора находится в условиях всестороннего сжатия. Растяжение коры, сопровождавшееся вулканизмом, чередовалось с ее сжатием, инверсионными движениями земной поверхности и реализацией надвигов в ходе планетарных циклических изменений тектонических напряжений с квазипериодичностью 2.5 млн лет.

### **Основные рабочие гипотезы о кайнозойском рифтогенезе на юге Восточной Сибири**

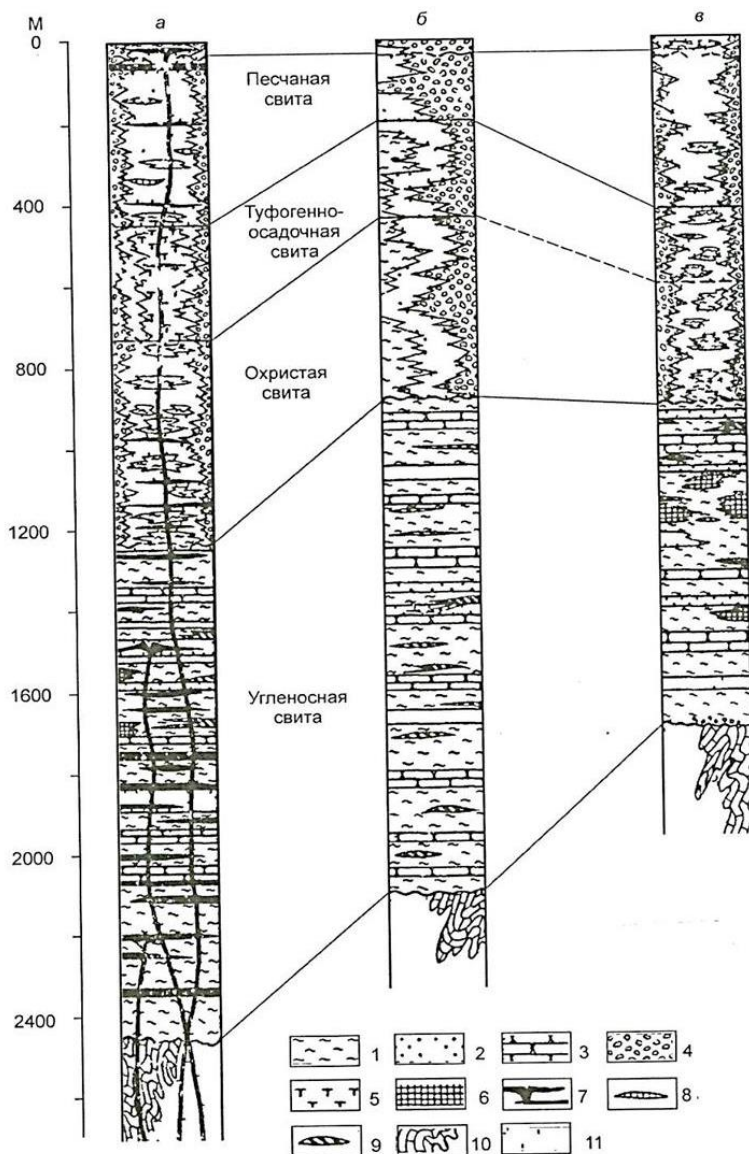
В 1950-гг. начались систематические исследования осадочного наполнения впадин байкальского типа. В первой обобщающей работе по мезозойским и кайнозойским впадинам Прибайкалья и Забайкалья Н.А. Флоренсова (1960) за Байкальской системой впадин утвердилось новое понятие Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). В 1960–1990-х гг. были опубликованы многочисленные работы в поддержку этой гипотезы. Определяющую роль в распространении этой гипотезы сыграли монографические обобщения Н.А. Логачева (1974, 1977).

Здесь рассматриваются основные рабочие гипотезы: 1) об определении БРЗ (1960 г.), 2) об определении палеоценовых отложений в Байкальской системе впадин (1970 г.), 3) об омоложении БРЗ от ее центральной части на северо-восток (1966 г.), 4) о раннеорогенном (добайкальском) и позднеорогенном (необайкальском) этапах тектонического развития БРЗ (1974 г.), 5) о влиянии Индо-Азиатской конвергенции на образование БРЗ (1975 г.), 6) о сдвиговых движениях в БРЗ (1968 г.), 7) о вращении в БРЗ (1978 г.), 8) о сегментном строении БРС (1996 г.); 9) о поперечной структурной зональности в БРЗ (1984 г.), 10) об определении Байкальской рифтовой системы (БРС) (1993 г.) и 11) о зонах аккомодации в БРС (1993 г.).

**Определение Байкальской рифтовой зоны**

Первые детальные стратиграфические исследования осадочного наполнения впадин байкальского типа проводились на Танхойском третичном поле (Пальшин, 1955) и в долинах, Тункинской и Баргузинской (Логачев, 1958, 1968). В Тункинской и Баргузинской долинах и в дельте р. Селенги были пройдены глубокие скважины. В результате этих работ обозначились преимущественно

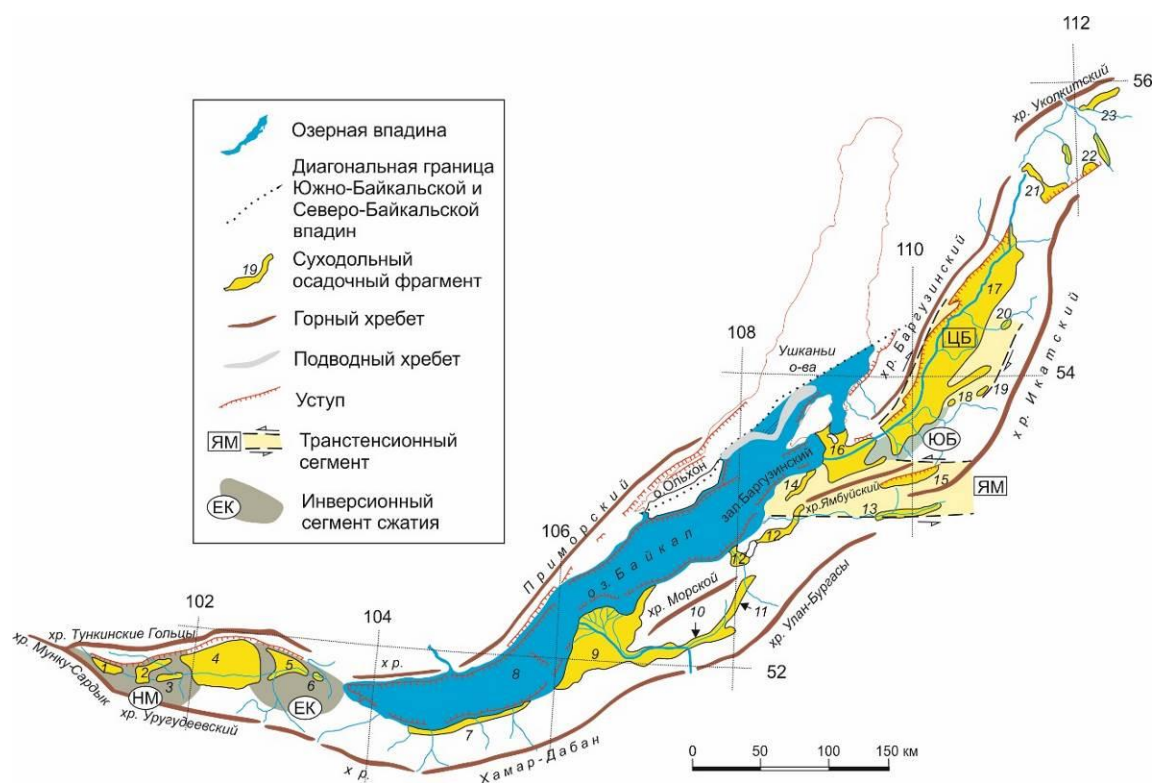
тонкозернистые угленосные отложения, выделенные в составе угленосной свиты. Выше угленосной свиты были охарактеризованы отложения охристой свиты, сложенной песками, гравелитами и галечниками, а еще выше – отложения песчаной свиты. Локально, в Тункинской впадине и на Еловском отроге выделялась туфогенно-осадочная свита (Логачев, 1958) (рис. 5).



**Рис. 5.** Сопоставление разрезов кайнозойских отложений Тункинской долины (а), юго-восточного побережья оз. Байкал (б) и Баргузинской долины (в) (Логачев, 1958). 1 – глины, алевриты, алевролиты; 2 – пески; 3 – песчаники; 4 – конгломераты, галечники, брекчии, гравийные пески; 5 – туфы, туффиты; 6 – диатомиты, диатомовые глины; 7 – базальты; 8 – торфяники; 9 – бурые угли; 10 – паропороды докембрия; 11 – ортопороды докембрия.

**Fig. 5.** Comparison of sections of Cenozoic sediments of the Tunka Valley (а), the southeastern coast of Lake Baikal (б), and Barguzin Valley (в) (Logatchev, 1958). 1 – clays, silts, siltstones; 2 – sands; 3 – sandstones; 4 – conglomerates, pebbles, breccias, gravel sands; 5 – tuffs, tuffites; 6 – diatomites, diatomaceous; 7 – basalts; 8 – peaty; 9 – brown coals; 10 – Permian volcanics; 11 – Permian orthoquartzites.

clays; 7 – basalts; 8 – peatlands; 9 – brown coals; 10 – Precambrian steam rocks; 11 – Precambrian orthorocks.



**Рис. 6.** Бассейны и хребты центральной части БРЗ. Впадины: 1 – Мондинская, 2 – Хойтогольская, 3 – Туранская, 4 – Тункинская, 5 – Торская, 6 – Быстринская, 7 – Танхойская, 8 – Южно-Байкальская, 9 – Усть-Селенгинская, 10 – Итанцинская, 11 – Хамская, 12 – Котокельская, 13 – Туркинская, 14 – Максимихинская, 15 – Ямбуйская, 16 – Усть-Баргузинская, 17 – Баргузинская, 18 – Ясская, 19 – Богундинская, 20 – Гаргинская, 21 – Амутская, 22 – Тураки, 23 – Нироконская. Транстензионные сегменты: ЦБ – Центрально-Баргузинский, ЯМ – Ямбуйский. Инверсионные секторы сжатия: ЕК – Еловско-Култукский, НМ – Ниловско-Мондинский, ЮБ – Южно-Баргузинский. В качестве основы использован фрагмент схематической карты центральной части БРЗ из работы (Флоренсов, 1960) с изменениями и дополнениями.

**Fig. 6.** Basins and ranges in the central part of the BRZ. Basins: 1 – Mondy, 2 – Khoitogol, 3 – Turan, 4 – Tunka, 5 – Tory, 6 – Bystraya, 7 – Tankhoi, 8 – South Baikal, 9 – Ust-Selenga, 10 – Itantsa, 11 – Khama, 12 – Kotokel, 13 – Turka, 14 – Maksimikha, 15 – Yambuy, 16 – Ust-Barguzin, 17 – Barguzin, 18 – Yassa, 19 – Bogundin, 20 – Garga, 21 – Amut, 22 – Turaki, 23 – Nirok. Transtension segments: ЦБ – Central Barguzin, ЯМ – Yambuy. Inversional sectors of compression: ЕК – Elovka-Kultuk, НМ – Nilovka-Mondy, ЮБ – South Barguzin. As a basis, a fragment of the sketch map of the central part of the BRZ from (Florensov, 1960) is used with changes and additions.

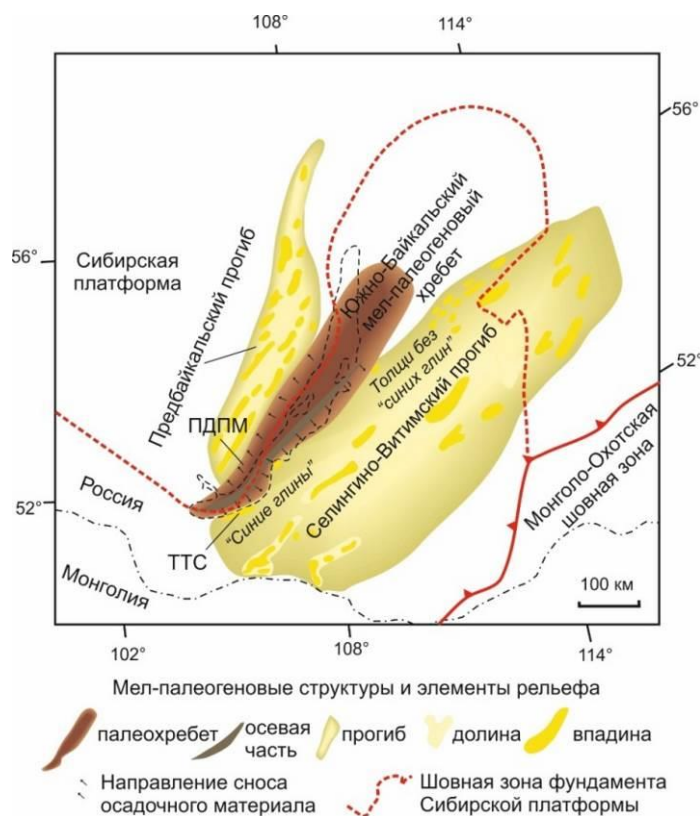
В ходе разработки легенды Государственных геологических карт, включающих впадины центральной части БРЗ, угленосная свита миоцена–нижнего плиоцена получила название танхойской по стратипу в районе ст. Танхой ( $N_1-N_2^{1tn}$ ) на южном побережье Байкала, а охристая свита верхнего плиоцена–эоплейстоцена – название аносовской свиты по стратипу р. Аносовка ( $N_2^2-Q_{Ean}$ ) здесь же. Вышележащая туфогенно-осадочная свита, распространенная локально в Тункинской впадине и на Еловском отроге,

вошла в литературу под названием «ахаликской свиты» (Логачев, 1974; Решения..., 1981). Однако в возрастном отношении эта свита оказалась вулканогенным возрастным аналогом аносовского осадочного стратона (Рассказов, 1993). Песчаная свита не получила собственного географического названия и в сущности является полихронной (Коломиец, 2010).

Дотанхойские кайнозойские отложения фрагментарно встречаются во впадинах байкальского типа и распространены в Селен-

гино-Витимском и Предбайкальском прогибах. Стратоны этих прогибов имеют возрастную диапозон от маастрихта до квартала (рис. 7). Со стратонами осевых впадин БРЗ

сопоставляются только стратоны верхней части разреза Селенгино-Витимского и Предбайкальского прогибов.



**Рис. 7.** Схема реконструкции основных морфоструктур мел-палеогенового рельефа на юге Восточной Сибири (Рассказов, Чувашова, 2018; Рассказов и др., 2021). Для ориентировки черной штриховой линией показан контур современного оз. Байкал. Районы исследований: Селенгино-Витимский прогиб и фланги Южно-Байкальской впадины (ТТС – Танхойская тектоническая ступень, ПДПМ – палеодолина Пра-Манзурки).

**Fig. 7.** Scheme of reconstruction of the main morphostructures of the Cretaceous-Paleogene relief in the south of Eastern Siberia (Rasskazov, Chuvashova, 2018; Rasskazov et al., 2021). For orientation, the black dashed line shows the modern outline of Lake Baikal. Research areas of the South Baikal basin (TTC – Tankhoi tectonic step, ПДПМ – Pra-Manzurka paleovalley).

Итак, благодаря работам Н.А. Флоренсова и Н.А. Логачева впадины БРЗ были маркированы последовательностью отложений, включающей танхойскую, аносковскую и песчаную свиты неогена-квартала. Более поздние работы показали, что разрез впадин байкальского типа существенно отличается от разрезов Предбайкальского и Селенгино-Витимского прогибов, повсеместно включающих более древние отложения (до маастрихта), что придало БРЗ и ее фланговым прогибам смысл единой структуры, получившей развитие на новейшем геодинамическом этапе.

Закреплению за Байкальской системой впадин статуса впадин БРЗ способствовало определение механизмов очагов сильных землетрясений сбросового типа в коре под впадинами оз. Байкал и сбросо-сдвигового типа под впадинами северо-восточной части этой системы (Мишарина, 1967). Такой характер деформаций коры в целом подтверждался утонением коры под впадинами (Недра..., 1981), преимущественно сбросовым и сдвиго-сбросовым характером движений по рельефообразующим разломам впадин (Геология..., 1984) и расхождением бортов впадин по данным спутниковой геодезии



(Sankov et al., 2000; Лухнев и др., 2003; Саньков и др., 2004; Ашурков и др., 2010).

#### *Определение палеоценовых отложений в Байкальской системе впадин*

Одним из основных вопросов, требующий решения, был вопрос о начале рифтогенеза. На Ахаликском буроугольном месторождении (Еловский отрог в Тункинской долине) скважинами была вскрыта 60-метровая вулканогенно-осадочная толща, датированная, предположительно, палеоценом по признаку латеритного выветривания материала (Хлыстов, Дехтярева, 1970). Ахаликская находка отложений, предположительно, палеоценовой коры выветривания служила аргументом для утверждения присутствия во впадинах байкальского типа палеоценового литостратиграфического комплекса (Логачев, 1974). Подобным образом предполагался палеоценовый возраст фрагментов красноцветных кор выветривания на о-ве Ольхон оз. Байкал (Мац и др., 2001), но в этом случае какое-либо подтверждение высокой степени преобразования материала или палеонтологическое обоснование возраста отсутствовало.

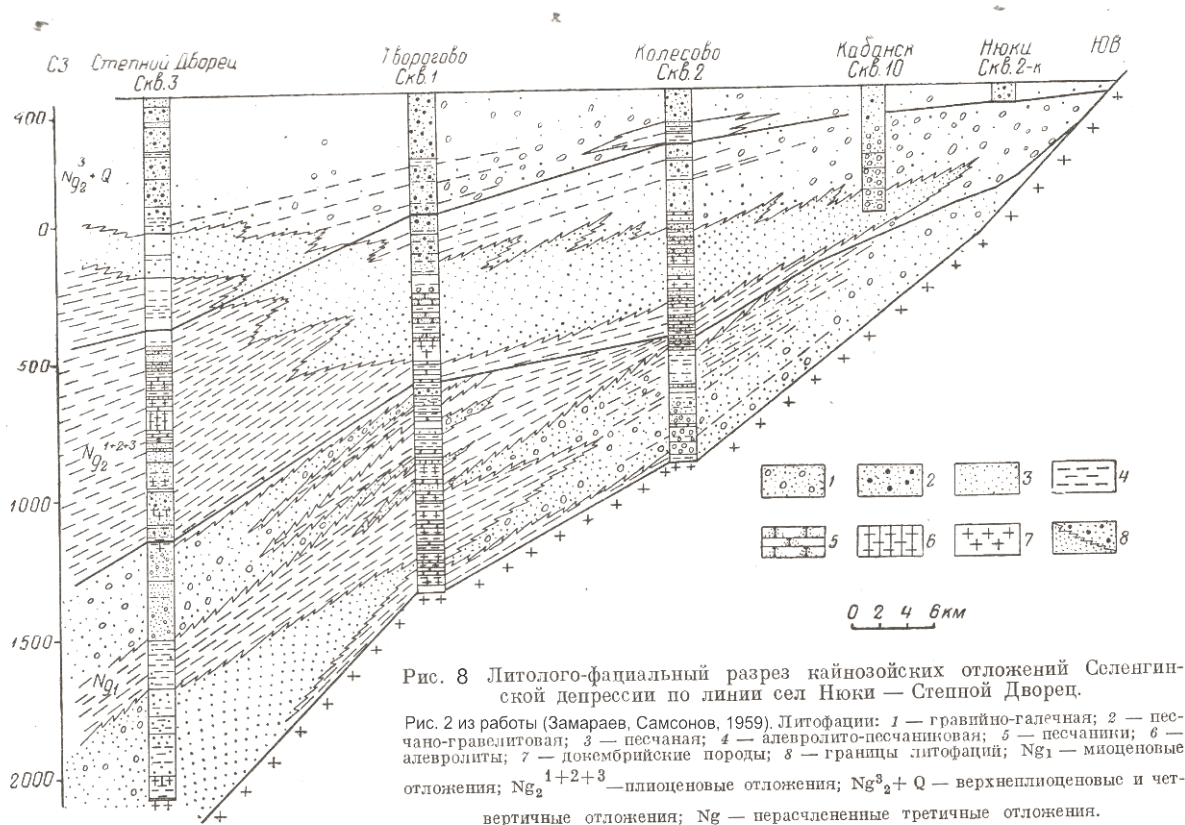
Сравнительное изучение красноцветных отложений в разных регионах Азии показало, что, несмотря на образование в условиях климатического оптимума, палеоценовые красноцветы Тянь-Шаня, юга Монголии и других территорий Центральной Азии не обнаруживают признаков латеритного выветривания с обогащением глиноземом. Химический анализ, предположительно, палеоценовой коры выветривания на м. Харалган о-ва Ольхон также не показал обогащения глиноземом. В Предбайкальском прогибе высокоглиноземистые породы залегают на красноцветных породах верхоленской свиты верхнего кембрия и, по-видимому, наследуют литологические характеристики этих пород в результате их местного размыва. Подобным образом, с отложениями верхнего кембрия пространственно связана осадочно-вулканогенная толща Еловского отрога.

Идентификация палеоценовых отложений только по признаку обогащения глиноземом вызывает сомнения (Рассказов и др., 2016).

В скважине Степной Дворец дельты Селенги на глубине 3100 м были вскрыты эоценовые отложения (Замараев, Самсонов, 1959; Файзулина, Козлова, 1966) (рис. 8). Предполагалось, что палеоценовые отложения могут находиться в нижележащей части разреза, поэтому для Южно-Байкальской впадины допускалось палеоценовое начало осадконакопления (Логачев, 1974, 2003). На побережье Байкала, однако, отложений древнее эоценовых по-прежнему не известно. По материалу коры выветривания северо-западного берега оз. Байкал М.М. Аракелянц было определено соотношение радиогенного аргона и радиоактивного  $^{40}\text{K}$ , соответствующее эоцену. Эоценовый возраст самых древних отложений в геологической структуре Южного Байкала подтвержден в Мишихинском разрезе Танхойской тектонической ступени (Аль Хамуд и др., 2019, 2022).

Датировка 72 млн лет, полученная К–Аг методом для базальтов ложа оз. Хобок на Еловском отроге (Рассказов, 1993), нуждается в подтверждении дополнительным радиоизотопным датированием.

Палеоценовая датировка коры выветривания  $59\pm 5$  млн лет была получена по кристаллам вермикулита размером 1–2 см из зоны выветривания в Задойском щелочно-ультраосновном массиве Присяня. Проводился ступенчатый нагрев кристаллов с выделением из общего  $^{40}\text{Ar}$  порции радиогенного аргона, накопившейся после нарушения К–Аг-изотопной системы палеоценовыми гипергенными процессами (Логачев и др., 2002). Эта находка коры выветривания пространственно соответствует юго-западному продолжению Предбайкальского прогиба и может маркировать палеоценовое поднятие ложа этой структуры с выведением пород из зоны латеритного выветривания.



**Fig. 8.** Lithological-facial section of the Cenozoic sediments of the Selenga depression along the line of the villages Nyuki - Stepnoy Dvoretz. Fig. 2 from (Zamaraev, Samsonov, 1959). Lithological facies: 1 – gravel-pebble; 2 – sand-gravelite; 3 – sandy; 4 – siltstone-sandstone; 5 – sandstone; 6 – siltstone; 7 – Precambrian rocks; 8 – boundaries of lithological facies. Ng<sub>1</sub> – Miocene deposits; Ng<sub>2</sub><sup>1+2+3</sup> – Pliocene deposits; Ng<sub>2</sub><sup>3+Q</sup> – Upper Pliocene and Quaternary deposits; Ng – undivided Tertiary deposits

### Омоложение БРЗ от ее центральной части на северо-восток

Идея о разрастании БРЗ к северо-востоку была положена в основу монографии «Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья» (Солоненко и др., 1966). В качестве показателя такого разрастания рассматривалось развитие малых впадин (Лурбунской, Ингамакитской и др.), названных эмбриональными, и проявление молодых вулканических извержений на хр. Удокан, предположительно, в плейстоцене и голоцене.

В настоящее время Южно-Байкальское звено Байкальской системы впадин может рассматриваться как ее часть, получившая развитие начиная с эоцена. В юго-западной части Баргузинской долины скважинами вскрыты олигоценые отложения (Хассан и др., 2022), а в Чарской впадине – среднемиоценовые (Еникеев, 1999). Следовательно

но, наиболее ранние отложения во впадинах омолаживались от Южного Байкала через Баргузинскую долину к Чарской впадине, что, в общем, подтверждает идею В.П. Солоненко о разрастании БРЗ к северо-востоку. Однако время разрастания определяется не плейстоценом и голоценом, как предполагал В.П. Солоненко, а эоценом, олигоценом и средним миоценом.

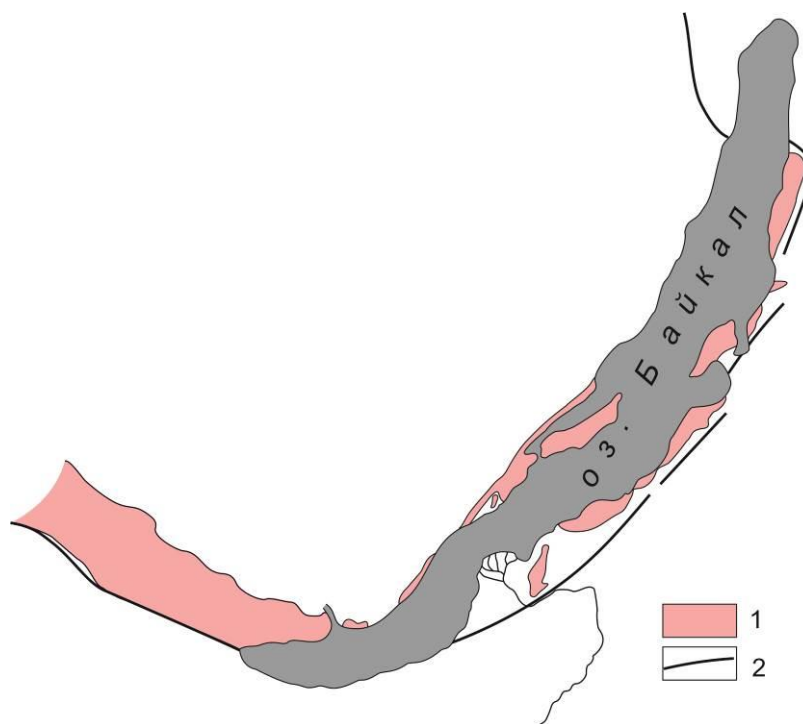
Заключительная серия извержений была датирована радиоуглеродным методом интервалом 14.4–2.04 тыс. лет (пересчитанный календарный возраст из работ (Девирц и др., 1981; Рассказов, 1999)). Однако более ранние вулканические события оказались плейстоценовыми только в западной части Удоканского вулканического поля. В его северной части извержения начались в среднем миоцене, около 14 млн лет назад, и с перерывами продолжались до голоцена (Рассказов и др., 2000). Со среднего миоцена вулка-

низм развивался импульсно в противофазе относительно извержений, происходивших на Витимском плоскогорье (Рассказов, Чувашова, 2018).

*Унаследованное развитие впадин оз. Байкал от структуры докайнозойского фундамента*

Образование Байкальской впадины сначала связывалось с выходами метаморфических пород фундамента по границе Сибирской платформы (рис. 9). В 1960-х гг. все породы гранулитовой фации метаморфизма считались архейскими. Между тем, в более поздних работах обращалось внимание на то, что в метаморфических породах Шарыжалгайского блока находятся тела высоко-

железистых гипербазитов (коматиитоподобных пород), а в метаморфических породах Приольхонья и о. Ольхон – тела более магнезиальных альпинотипных гипербазитов (Грудинин, Меньшагин, 1987; Байкал..., 2011). Коматиитоподобные породы рассматривались как маркирующие для выходов пород фундамента Сибирского палеоконтинента. Находки тел коматиитоподобного состава на м. Хадарта (Малое Море) и п-ове Святой Нос свидетельствовали о тектоническом отторжении фрагментов фундамента и вовлечении их в тектонический меланж аккретированных раннепалеозойских террейнов (Чувашова, Рассказов, 2014).



**Рис. 9.** Ранняя интерпретация структурного положения впадины оз. Байкал ((Ламакин, 1968) с упрощениями). 1 – глыбы метаморфических (архейских) пород; 2 – основные разломы, ограничивающие фундамент Сибирской платформы.

**Fig. 9.** Early interpretation of structural setting of the Lake Baikal basin. Simplified after (Lamakin, 1968). 1 – blocks of metamorphic (Archean) rocks; 2 – main faults that limit the basement of the Siberian platform.

Следовательно, идея унаследованного развития впадины от зоны распространения метаморфических пород, связанных с фундаментом палеоконтинента в общем подтверждается. Хотя граница южного края фундамента Сибирской платформы трассирована выступами палеопротерозойских осадочных и вулканогенно-осадочных обра-

зований, расположенных севернее Байкальской впадины, она, по-видимому, имеет в целом рассеянный характер и представляет собой широкую тектоническую зону распространения пород Ольхонского метаморфического террейна.

*Раннеорогенный (добайкальский) и позднеорогенный (необайкальский) этапы развития БРЗ*

Поскольку в БРЗ поднятия по площади существенно преобладают над впадинами, развитие этой структуры связывалось с орогенными процессами (горообразованием). Такое восприятие БРЗ отличалось от разделения орогенеза как процесса, развивающегося в результате сжатия коры, и рифтогенеза (тафрогенеза) как процесса ее растяжения. Например, в Тибетско-Гималайском орогене, имеющем 74-километровую кору, обозначаются рифты (Шенгёр, Натальин, 2009).

По характеру осадконакопления во впадинах БРЗ различалось два этапа тектонического развития территории: раннеорогенный (добайкальский) и позднеорогенный (необайкальский). Предполагалось, что на раннеорогенном этапе накапливалась угленосная (танхойская) свита при спокойном опускании впадин в условиях влажного и теплого климата. На позднеорогенном этапе накапливалась «охристая» (аносовская) свита при резком поднятии горных хребтов и опускании впадин в условиях аридизации и похолодания климата (Логачев, 1974).

Необайкальский этап обозначен образованием глубокого Байкала. О быстром опускании котловины Байкала свидетельствует состав отложений центральных частей Северного и Среднего Байкала, в которых под 2–3-метровым слоем пелитовых илов залегает песок и гравий. Вскрытая мощность грубозернистых отложений достигает 7 м. Следовательно, в недавнем геологическом прошлом осадки, вскрытые ныне на глубине 1000 м и более, накопились на мелководье вблизи суши – источника грубозернистого материала. Медленное накопление осадков не компенсировало быстрое погружение ложа котловины Байкала (Логачев, 1974).

Морфология подводной части Байкальской впадины зависела от соотношения опускания дна и привноса осадочного материала. Первые подсчеты осадконакопления в Байкале для удаленных от берегов участков дали оценку скорости 4.2 см за 1000 лет (Вотинцев и др., 1965). По палеомагнитным данным были получены оценки скорости

накопления осадков в Северном Байкале на порядок меньше – 0.2–0.7 см за 1000 лет (Кравчинский и др., 1971).

О времени образования озера и глубоководной Байкальской впадины выдвигались разные предположения. По скорости отложения осадков время накопления дельтовых толщ рек Верхняя Ангара и Кичера оценивалась в 560 тыс. лет (Гурулев, 1959). Позже предполагалось ее образование на границе среднего и верхнего плейстоцена (Аносов, 1964) (т.е. около 126 тыс. лет назад). По палеогеографической реконструкции позднего плейстоцена делался подобный вывод о том, что единый глубоководный бассейн, резко отличавшийся от олигоценовых, миоценовых и плиоценовых палеоводоемов, образовался около 100 тыс. лет назад (Лопатин, Томилов, 2004).

В дискуссии о возрасте глубокого Байкала (Логачев, 1974; Лопатин, Томилов, 1977, 2004; Лопатин, 2016; Кононов, Хлыстов, 2017) привлекались данные по интерпретации происхождения и возраста древних палеодолин Пра-Манзурки и Пра-Анги на Ангаро-Ленском междуречье северо-западного побережья Байкала. Высказывалась крайняя точка зрения, в которых делался упор на находке аллювия Пра-Мазурки у мыса Роговик, вблизи устья р. Голоустной, на высоте 350 м над уровнем озера, и допускалось отсутствие оз. Байкал в манзурское время. В сухоходольный этап развития Южно-Байкальской впадины верховья Пра-Манзурки относились к Пра-Селенге (Лопатин, Томилов, 1977, 2004; Лопатин, 2016).

Таким молодым оценкам времени образования глубокого Байкала противоречат биостратиграфические, геологические и биологические факты.

В биостратиграфическом подходе по распространению глин больших мощностей и вмещающих их диатомитов намечены контуры раннеплиоценового озерного бассейна, охватывающего среднюю и северную части акватории Малого моря и протягивающегося почти в субширотном направлении до Баргузинского залива. На юго-восточном побережье Байкала обозначается обширный раннеплиоценовый озерный водоем (Лут и др., 1984).



В antecedentном отрезке долины р. Селенги, между хребтами Хамар-Дабан и Улан-Бургасы, отсутствовали отложения древнее эоплейстоценовых (Логачев, 1974). «Возраст мергелей Посольской банки на глубине 600 м от вершинной поверхности по палинологическим данным оказался не древнее начала раннего плейстоцена (2.58–1.8 млн лет), а возраст аргиллитов Кукуйской гривы на горизонте 450 м ниже вершины – середина раннего плейстоцена (1.8–1.5 млн лет). Таким образом, полученные данные убедительно показывают наличие древней дельты р. Селенги, что предполагает существование озерного принимающего бассейна, достаточно глубокого и обширного, соответствующего масштабу впадающей реки, и отрицают возможность существования транзитной реки через Байкальскую впадину» (Кононов, Хлыстов, 2017, с. 122).

Скоростной разрез авандельты р. Селенги интерпретировался, исходя из средней скорости накопления отложений 17 см за 1000 лет. Клиноформные пачки перемежаемости отложений авандельты с пелагическими осадками были идентифицированы в верхней 2-километровой части разреза. Сделан вывод о том, что депоцентр авандельты развивался в последние 3–2 млн лет (Scholz, Hutchinson, 2000). Эти построения не противоречат выводу об эоплейстоценовом образовании прорези долины р. Селенги (Логачев, 1974). К этому следует добавить результаты бурения 600-метровой скважины ВДР-98 на подводном Академическом хребте, пройденной по сравнительно монотонной озерной осадочной толще, содержащей планктонные диатомовые водоросли. Возраст вскрытых озерных отложений составляет около 8 млн лет (Кузьмин и др., 2014; Kravchinsky, 2017).

Данные, приведенные в настоящем разделе, согласуются с выводом о едином развитии аллювиального осадконакопления на Танхойской тектонической ступени с эоцена до начала плиоцена и последующем резком изменении характера тектонических деформаций в Южно-Байкальской впадине, которые привели к образованию высоких горных хребтов и глубокого Байкала (Аль Хамуд и др., 2021). Имеющиеся факты противоречат

предположению о сухоходольном этапе развития Южно-Байкальской впадины с существованием единой долины от Пра-Селенги к Пра-Манзурке (Лопатин, Томилов, 1977, 2004; Лопатин, 2016), хотя нельзя исключить возможность длительного существования речных водотоков, пересекавших будущий Байкал от Мишихинско-Клюевской и/или Осиновской палеодолин, обозначенных в работе (Рассказов и др., 2014). Такая реконструкция требует конкретной аргументации с представлением данных о единстве аллювиального материала Мишихинско-Клюевской (и/или Осиновской) палеодолин с одновозрастным аллювиальным материалом Манзурской палеодолины и/или других вероятных палеодолин на северо-западном побережье Байкала.

В донных отложениях озера определены остатки рода *Lamprodrilus wagneri*, который появился на оз. Байкале 4.3–3.3 млн лет назад. Большинство видов этого рода обитает только в холодной воде и на глубинах от 400 до 900 м (Kaugorodova et al., 2007). По данным молекулярно-биологических исследований эндемичные виды хирономид (Baikolian) *Sergentia* восходят к времени существования озерного бассейна порядка 25–26 млн лет назад (цитируется по работе (Кононов, Хлыстов, 2017)).

Биологические оценки дают ограничения возраста глубокого Байкала, независимые от геологических оценок. Определяющее значение остается за геологическими данными, свидетельствующими о том, что в окружении Байкала раннеорогенный (добайкальский) этап сменяется позднеорогенным (необайкальским) (Логачев, 1974).

#### *Влияние Индо-Азиатской конвергенции на образование БРЗ*

Предположение о влиянии Гималайско-Тибетской области сжатия на орогенез в Азии было выдвинуто Эмилем Арганом на Геологическом конгрессе в Париже в 1923 г. (Хаин, Яблонская, 1979). Эта гипотеза получила новое звучание в статьях о четвертичной тектонике Азии П. Молнара и Ж. Таппонье (Molnar, Tarronnier, 1975; Tarronnier, Molnar, 1979). Большую популярность приобрели построения, основанные на предпо-

ложении о развитии деформаций в литосфере Внутренней Азии, включая Байкальскую систему впадин, вследствие распространения процессов коллизии, произошедшей в раннем кайнозое между Индостаном и Азией. До сих пор эта точка зрения часто принимается без какой-либо аргументации, хотя один из авторов гипотезы (П. Молнар) признал в более поздних работах факт кардинальной смены современного напряженно-деформированного состояния коры на территориях, с одной стороны, Гималаев и Тибета, с другой – Монголии и Байкала (England, Molnar, 1997).

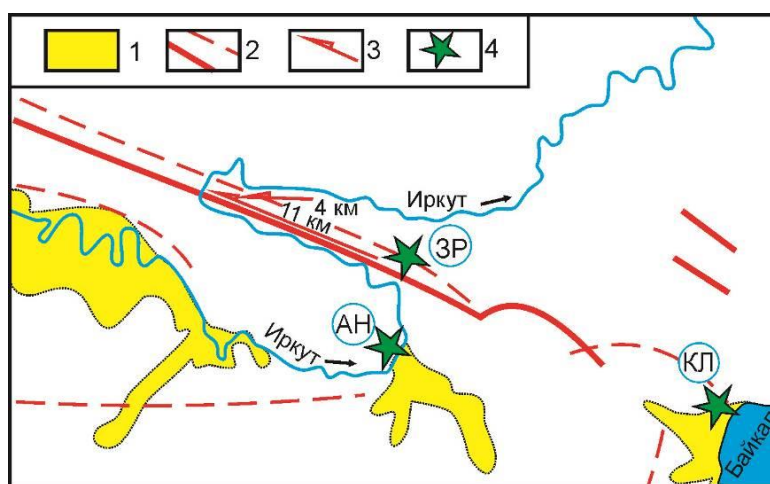
Согласованное развитие Тибетско-Гималайской структуры и структур юго-западной части Байкальской рифтовой системы получило аргументацию через сходство пространственно-временного развития вулканизма (Рассказов и др., 2012).

#### Сдвиговые смещения в БРЗ

В интерпретациях структуры Байкальской рифтовой системы допускалось (в порядке появления): 1) образование Байкальской впадины при крупномасштабных левосторонних сдвиговых смещениях по западно-северо-западному Зыркузунскому (Главному Саянскому) разлому и субширотному разлому на Среднем Байкале (Ламакин, 1968), 2) поперечное сдвиговое смещение в рифтовой зоне по северо-западным и субмеридиональ-

ным разломам (Хренов и др., 1975; Уфимцев, 1987), 3) левостороннее смещение в северо-восточной части Байкальской рифтовой зоны (Molnar, Tapponnier, 1975), 4) смещения по продольным (субширотным) разломам в северо-восточной и юго-западной частях рифтовой зоны (Шерман, Леви, 1977, 1978; Шерман, 2014).

Оценка амплитуды левосторонних движений порядка 15 км по Главному Саянскому разлому основывалась на смещении русла р. Иркут в Зыркузунской петле (Ламакин, 1968) (рис. 10). По сходной (левосдвиговой) современной кинематике смещений в субширотных плоскостях разрывов, установленных по фокальным механизмам сильных землетрясений, Култукская (западная) половина Южно-Байкальской впадины, относилась вместе с Тункинской долиной к широтной подвижной зоне (Мельникова и др., 2012), несмотря на существование в восточной части этой долины области сейсмического затишья. Очевидно, что для определения истинной амплитуды кайнозойских боковых движений в Главном Саянском разломе и Тункинской долине необходимо использовать сдвинутые геологические реперы в крыльях этих структур. В качестве реперов могут использоваться вулканические породы.



**Рис. 10.** Кажущийся Зыркузунский (Главный Саянский) «левосторонний сдвиг» с предположительной амплитудой 15 км. 1 – четвертичные отложения; 2 – древние разломы; 3 – «молодые сдвиги»; 4 – местоположение среднемиоценовых Култукского (КЛ), Анчукского (АН) и Зыркузунского (ЗР) вулканов, не смещенных предполагаемым сдвигом. На территории между Зыркузунской петлей и Байкалом разлом не имеет ясного выражения в рельефе. Схема из книги В.В. Ламакина (1968) с дополнениями местоположения ранне-среднемиоценовых вулканов.

**Fig. 10.** Apparent Zyrkuzun (Main Sayan) "left lateral shift" with the proposed amplitude of 15 km. 1 – Quaternary sediments; 2 – ancient faults; 3 – "young shifts"; 4 – locations of the Middle Miocene Kultuk (КЛ), Anchuk (АН), and Zyrkuzun (ЗР) volcanoes, not consistent with the expected shift. In the area between the Zyrkuzun loop and Baikal rift, the fault shows no clear expression in relief. The scheme is after (Lamakin, 1968) with additions showing locations of the Early-Middle Miocene volcanoes.

При изучении Култукского вулкана эти оценки, однако, не подтвердились. Вулкан расположен в области сочленения Обручевского и Главного Саянского разломов. Первый разлом ограничивает с севера Южно-Байкальскую впадину, второй – отделяет архейский Шарыжалгайский выступ фундамента Сибирской платформы от сопредельного раннепалеозойского Хамардабанского составного террейна. Предполагалось, что в кайнозое Обручевский разлом был сбросом, а Главный Саянский – левосторонним сдвигом.

Крупноамплитудному Зыркузунскому сдвигу (или сдвигу Главного Саянского разлома) на изгибе долины р. Иркут придавалось в кайнозое значение «расщеления Южной котловины Байкала в северном направлении» (Ламакин, 1968; с. 128). Позже это же допущение было положено в основу палинспастических реконструкций ее раскрытия (Балла и др., 1990). В модели трансформных разломов Байкальской рифтовой зоны также предполагались сдвиговые смещения, но не по Главному Саянскому разлому, а вдоль Тункинской рифтовой долины (Шерман, Леви, 1977). В обеих схемах образования южно-байкальской части Байкальской рифтовой зоны придавалось решающее значение крупноамплитудным сдвигам.

Между тем, изгиб р. Иркут в Зыркузунском ущелье мог унаследовать неоднородности пород фундамента, на что в свое время указывал И.Д. Черский. Предполагаемые сдвиговые смещения на кайнозойском этапе в этом случае не играли никакой роли в изгибании речного русла. И действительно, линейная конфигурация вулканических зон и разнесенных по высоте фрагментов вулканических и субвулканических тел свидетельствует об отсутствии боковых смещений. Кулисное расположение Камарской и Становой зон интерпретируется как свидетельство трансенсии в субмеридиональной системе Камарской и Становой зон, суще-

ствовавшей во временном интервале 18–12 млн лет назад.

В то же время вертикальные движения по Обручевскому сбросу подтверждаются геологическими реперами. Суммарную амплитуду сброса дает оценка мощности кайнозойских отложений до 4 км и водная линза толщиной 1 км в западной части Южно-Байкальской впадины (Logatchev, Zorin, 1992). Култукский вулкан находится на ветви Обручевского разлома, вырождающейся по его простирацию. Быстрое затухание амплитуды вертикальных смещений вдоль разлома с востока на запад, сопровождающееся наклоном поверхности блока вулкана к востоку, свидетельствует о шарнирной кинематике движений (Рассказов и др., 2013).

Поперечное сдвиговое смещение в рифтовой зоне отмечались по локальным северо-западным и субмеридиональным разломам (Хренов и др., 1975; Уфимцев, 1987). Какое значение имели поперечные разломы для развития Байкальской системы впадин, осталось неясным.

В качестве зоны левосторонних смещений интерпретировалась кулисообразная система впадин северо-восточной части БРЗ (Molnar, Tapponnier, 1975). П. Таппонье проводил эксперименты с глинистой пастой и поэтому интерпретировал кулисообразный характер проявления активных разломов в рельефе как показатель левосторонней сдвиговой зоны. Эта интерпретация нашла отклик в более поздних работах разных авторов по северо-восточной части БРЗ.

Кроме северо-восточной части БРЗ и Среднего Байкала, левосторонние смещения обозначались вдоль Тункинской долины и Болнайского разлома в Северной Монголии. Сочетанию четырех зон сдвиговых смещений придавалось значение «трансформных разломов» межплитной границы. Предполагалось, что сочетание рифт–трансформный разлом–рифт должно играть такую же роль как сочетание этих структурных элементов в срединных хребтах океанов. Механизм,

включающий относительное боковое смещение сегментов океанического дна по трансформному разлому, был предложен канадским геофизиком Тузо Вилсоном (Wilson, 1965) для объяснения разной скорости спрединга с заполнением раздвигающейся океанической коры базальтовыми расплавами. Мог ли подобный процесс иметь место в Байкальской системе впадин?

Зоны современного межплитного наращивания океанической коры трассируются низкокальциевыми базальтами обедненного геохимического типа (базальты срединно-океанических хребтов – Mid-Ocean Ridge Basalts, MORB), а активные конвергентные межплитные границы – зональными надсубдукционными вулканическими комплексами (андезитами). На трансформных межплитных границах регистрируются различные проявления магматизма из мантийных и коровых источников без определенной специфики. Вольное использование термина «трансформный разлом» отразило начало кризиса тектоники литосферных плит с их делением на «микроплиты», появившаяся в работах 1970–1990-х гг. Такие работы появились вследствие несоблюдения постулата плитной тектоники о жесткости литосферных плит. Однако идея «микроплит» не получила обоснования с точки зрения магматической геодинамики в той мере как тектоника литосферных плит. «Микроплиты» не разделяются между собой спрединговыми зонами и не обозначаются специфическими надсубдукционными магматическими комплексами. Иными словами, границы «микроплит» не имеют такого же значения как принятые границы литосферных плит.

На территории Азии термин «микроплита» и другие термины тектоники литосферных плит использовались в работах некоторых авторов для объектов, обозначенных термином «геоблок». Современная территория Забайкалья, относящаяся, например, к «Амурской микроплите» и отличающаяся полем скоростей от стабильной Азии, имеет сейсмотектоническую границу на севере, соответствующую Байкальской рифтовой зоне. Западная, южная и восточная границы этой «микроплиты» проводятся произвольно и большей частью не имеют современного

структурного выражения. Внутренняя часть «Амурской микроплиты» характеризуется сейсмичностью, высокой подвижностью и вулканическими проявлениями (например, в ней находятся Витимское и Дариганское вулканические поля). Очевидно, что в этих конкретных и подобных случаях термины «микроплита» и «граница между микроплитами» не отражают содержание, которое имеют термины «литосферная плита» и «межплитная граница». Литосфера Азии подвижна в системах, таких как Байкальская, Центрально-Азиатская, Циркум-Ордосская и др., разделяющих относительно стабильные геоблоки. Соответственно, границы таких подвижных систем определяются пространственной сменой конвергентного, дивергентного или смешанного деформационных режимов.

### *Вращение в БРЗ*

В БРЗ предлагалось два взаимоисключающих варианта относительного вращения Сибирского и Забайкальского геоблоков: 1) с полюсом Эйлера, расположенным на плато Путорана и 2) с полюсом Эйлера на северо-восточном окончании.

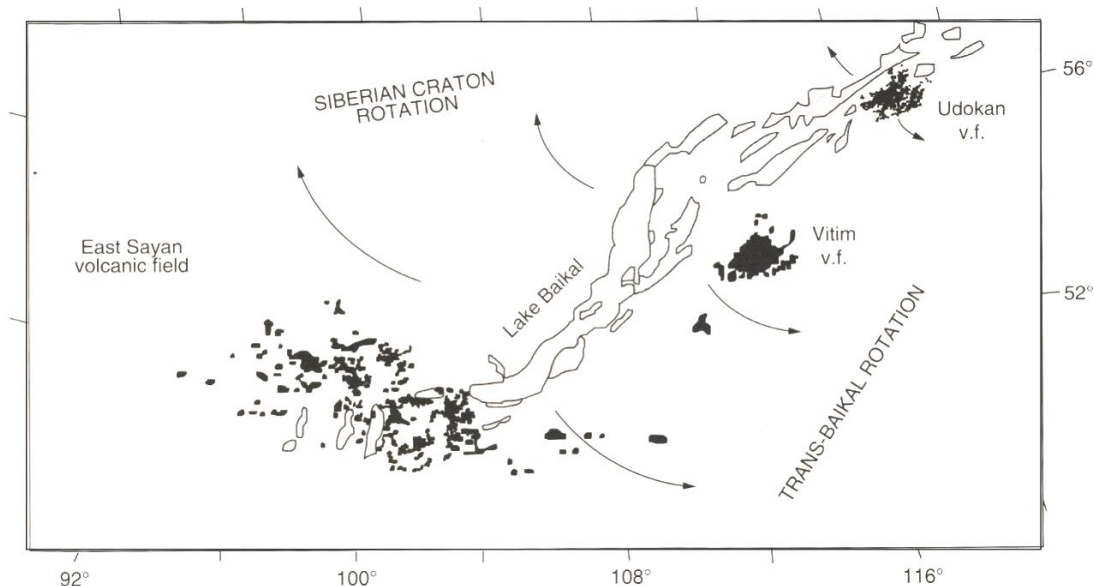
По первому варианту предполагалась передача движений между раздвиговыми Северо-Байкальской и Чарской впадинами по единой системе кулис Муйско-Чарского разлома. Образование Баргузинской и Ципа-Баунтовской впадин связывалось с активностью другого (Байкало-Чарского) разлома. Соответственно, такие же движения распространялись на Тункинскую долину и Болнайский разлом (Шерман, Леви, 1977, 1978). Механизмы очагов землетрясений не учитывались.

По второму варианту, вращение в БРЗ определялось при статистическом анализе ориентировок осей растяжения в очагах землетрясений в ее центральной и северо-восточных частях и на ее юго-западную часть не распространялось (Зоненшайн и др., 1978). Приблизительно там же предполагался полюс вращения при оценке относительного расхождения в БРЗ блоков Сибирской платформы и Забайкалья по гравиметрическим аномалиям (Зорин, Кордел, 1991) и по модели неравномерной сегментации БРС,



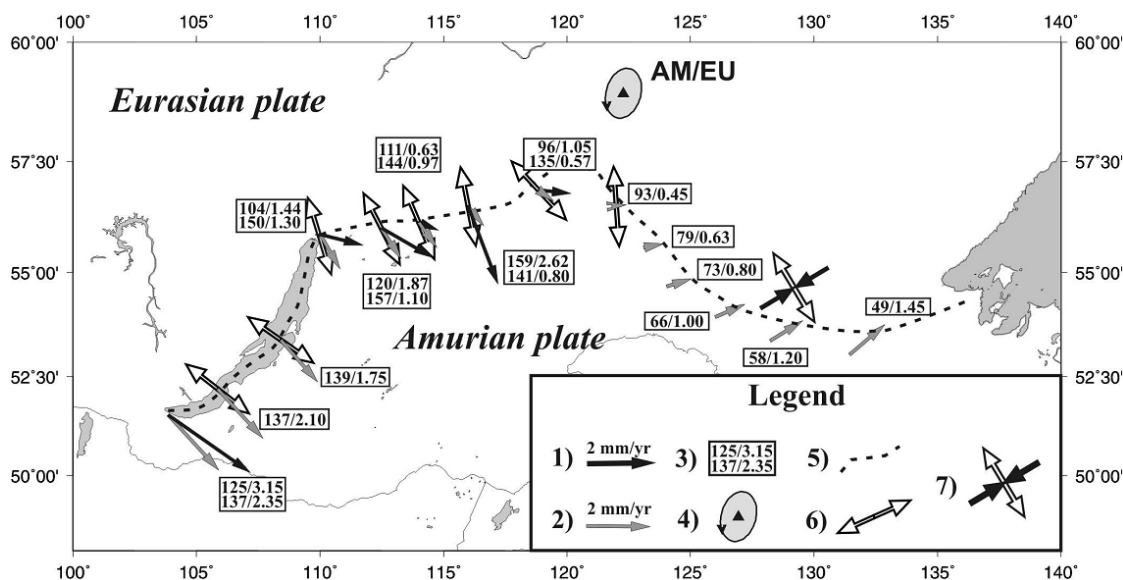
отразившейся в пространственно-временном распространении вулканизма (рис. 11) (Rasskazov, 1994; Рассказов, 1996). Затем поло-

жение полюса вращения приблизительно в том же месте БРЗ подтвердилось результатами спутниковой геодезии (рис. 12).



**Рис. 11.** Схема относительного вращения Сибирского кратона и Забайкалья на основе решений фокальных механизмов очагов землетрясений (Зоненшайн и др., 1981), гравиметрических данных (Зорин, Корделл, 1991) и распределения вулканизма. Из работы (Rasskazov, 1994).

**Fig. 11.** Scheme of the relative rotation of the Siberian craton and Trans-Baikal based on focal-mechanism solutions (Zonenshain et al., 1978), gravity data (Zorin & Cordell, 1991), and volcanism distribution. After (Rasskazov, 1994).



**Рис. 12.** Скорости дивергенции и конвергенции на межплитной границе Евразийской и Амурской плит. 1 – векторы дивергенции по геологическим данным (Саньков и др., 2004 с изменениями; Sankov et al., 2000); 2 – теоретические векторы движений по данным GPS-измерений; 3 – азимут/скорость в мм/год (сверху – по геологическим данным, снизу – по данным GPS); 4 – полюс вращения Амурской плиты относительно Евразийской (эллипс – ошибка определения полюса, стрелка указывает на вращение против часовой стрелки); 5 – межплитная граница; 6 – ориентация минимального горизонтального сжимающего напряжения Sh (Petit et al., 1996); 7 – ориентация максимального (SH – черные стрелки) и минимального (Sh – белые стрелки) сжимающего напряжения (Barth, Wenzel, 2009).

**Fig. 12.** Divergence and convergence velocities within Eurasian and Amurian interplates boundary. 1 – vectors of divergence from geological data (Sankov et al., 2004 with editions; Sankov et al., 2000); 2 – theoretical vectors of movements from GPS data; 3 – azimuth/velocity mm/yr (top – for geology data, bottom – for GPS data); 4 – rotation pole of Amurian plate relative to Eurasian one (ellipse – pole error, arrow shows counterclockwise rotation); 5 – interplate boundary; 6 – orientations of minimal horizontal compression stress  $Sh$  (Petit et al., 1996); 7 – orientations of maximum ( $SH$  – black arrows) and minimum ( $Sh$  – white arrows) horizontal compressional stress (Barth, Wenzel, 2009) Divergence and convergence velocities within Eurasian and Amurian plates boundary.

Как видим, вращение в центральной и северо-восточной частях БРЗ, происходящее с полюсом Эйлера на ее северо-восточном окончании, аргументировано независимыми данными. В этой гипотезе отражается современное растяжение коры. Она согласуется с данными об омоложении структур от Южно-Байкальской впадины к северо-востоку и не противоречит развитию долговременных процессов, обозначенных более ранним вулканизмом на юго-западе БРС и несколько запаздывающим – на северо-востоке (соответственно, с началом в позднем олигоцене и в среднем миоцене). Нужно добавить смену источников вулканизма, от рассредоточенных на большой территории литосферных на юго-западе к концентрированным подлитосферным (Витимское поле) и литосферным (Удоканское поле) – на северо-востоке (Рассказов, Чувашова, 2018).

Фактор вращения в БРЗ, однако, не объясняет происхождение Витимской расплавленной аномалии.

#### *Сегментное строение БРС*

Наличие Витимской расплавленной аномалии и проявление не только пространственной, но и временной смены деформаций объясняется гипотезой сегментного строения рифтовой системы (Логачев и др., 1996; Рассказов, 1996).

Сегменты БРС различаются по типу преобладающих деформаций. Часть из них имеет преимущественно раздвиговое происхождение. В таких деформационных сегментах впадины ориентированы перпендикулярно по отношению к направлению их боковой «трансляции». В других сегментах растяжение сопровождалось боковыми смещениями с образованием кулисообразных совокупностей субпараллельных впадин, составляющих зоны трансенсии.

Структурные окончания Байкальской рифтовой системы существенно различают-

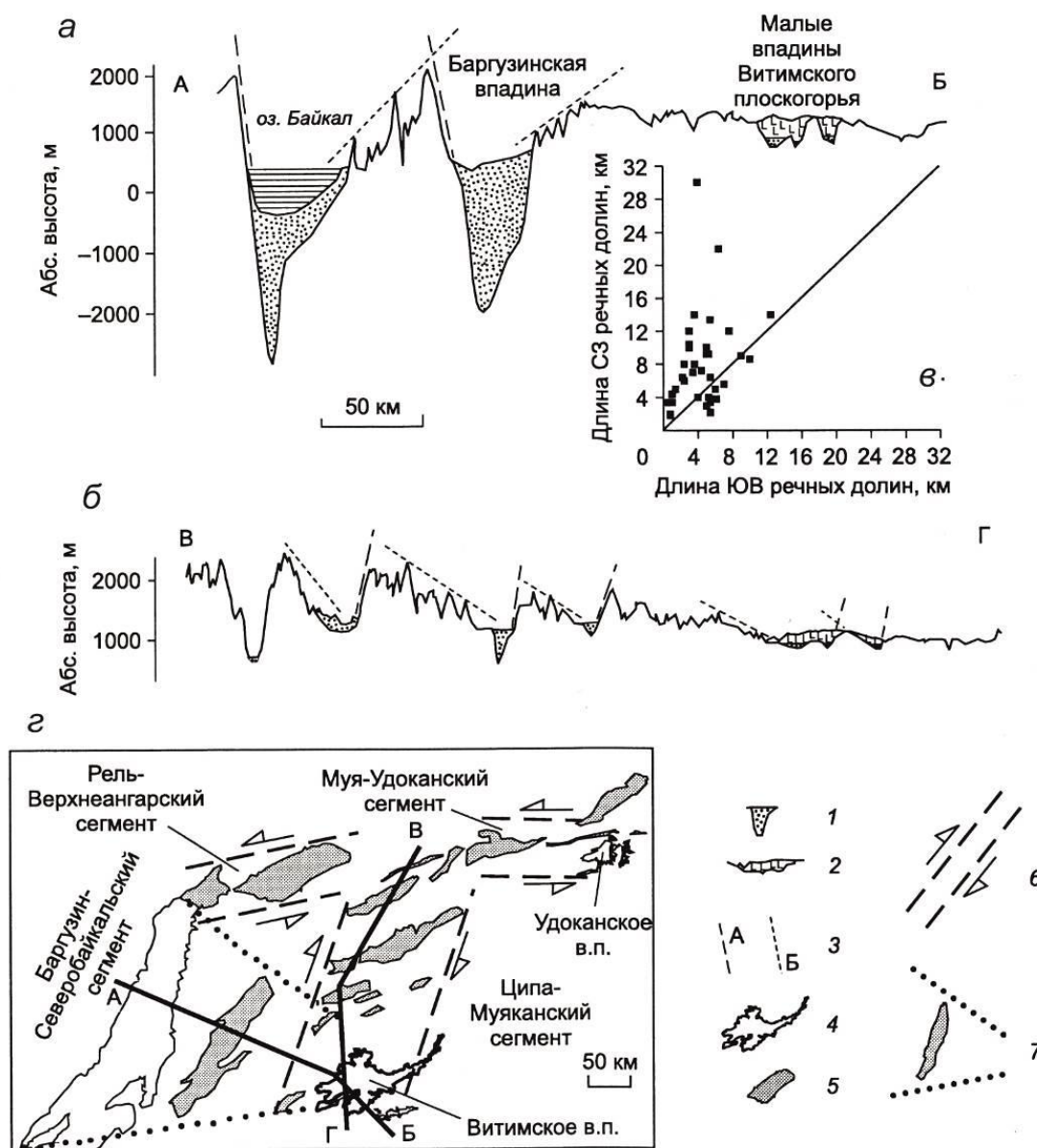
ся между собой по строению сегментов растяжения и их соотношениям с вулканическими полями. Вулканизм контролируется трансенсионными сегментами в Западном и Северном Забайкалье, в Центральной Монголии и Юго-Западном Прибайкалье. В юго-западной части основным структурным элементом является Восточно-Саянское параболическое поднятие, пространственно подчеркивающее контур Саяно-Хамардабанской расплавленной аномалии (Рассказов, 1994). Признаки трансенсионных сегментов здесь отсутствуют.

В северо-восточной части Байкальской рифтовой системы сочетаются сегменты: Ципа-Муяканский, Рель-Верхнеангарский и Муя-Удоканский. Правосторонний трансенсионный Ципа-Муяканский сегмент простирается субмеридионально с небольшим отклонением на северо-северо-восток. Левосторонние трансенсионные Рель-Верхнеангарский и Муя-Удоканский сегменты протягиваются в субширотном направлении. Удоканский и Витимский вулканические поля находятся на окончаниях, соответственно, Муя-Удоканского и Ципа-Муяканского сегментов. Впадины Баргузин-Северо-Байкальского сегмента образовались в обстановке преобладающих раздвиговых деформаций.

На профиле, пересекающем впадины раздвигового Баргузин-Северо-Байкальского сегмента (профиль А–Б на рис. 13) обозначилась асимметрия, характерная для впадин байкальского типа, – крутой западный борт и пологий восточный. На профиле, пересекающем впадины трансенсионного Ципа-Муяканского сегмента (профиль В–Г) наметилась противоположная асимметрия с пологими северными бортами впадин и более крутыми южными. Асимметрия малых впадин Витимского плоскогорья, заполненных лавами и осадками, согласуется с асиммет-

рией впадин транстензионного Ципа-Муяканского сегмента. Эти впадины были выявлены в результате бурения на территории Витимского плоскогорья, после чего

стало ясно, что структура Витимского вулканического поля сформировалась как часть транстензионного Ципа-Муяканского сегмента.



**Рис. 13.** Пространственные соотношения малых впадин Витимского плоскогорья с впадинами Байкальской рифтовой зоны (Рассказов и др., 2007). На профилях А–Б (а) и В–Г (б): 1 – впадина; 2 – лавы; 3 – крутой (А) и пологий (Б) борта впадины. График в показывает соотношения длин северо-западных и юго-восточных погребенных речных долин вулканического плато. На схеме г: 4 – контур вулканического поля; 5 – впадина; 6 – транстензионный сегмент; 7 – раздвиговой сегмент.

**Fig. 13.** Spatial relations between small basins of the Vitim volcanic field and basins of the Baikal rift zone (Rasskazov et al., 2007). On profiles А–Б (a) and В–Г (б): 1 – basin; 2 – lavas; 3 – steep (А) and flat (Б) sides of a basin. The plot в shows ratios of the lengths of the buried north-western and south-eastern river valleys in the volcanic plateau. In scheme г: 4 – contour of a volcanic field; 5 – basin; 6 – transtension segment; 7 – spreading segment.

Реконструкции пространственно-временного распределения кайнозойского вулканизма и осадконакопления на Витимском плоскогорье, приведенные в работе

(Расказов и др., 2007), свидетельствуют о временном чередовании сдвигового и раздвигового режимов. Погружение системы впадин Еравнинской депрессии началось в конце мела (кампан-маастрихт), а вулканическая деятельность проявилась здесь в начале палеогена (60–50 млн лет назад). В это время пока трудно судить о характере деформаций коры. В середине – второй половине олигоцена (около 29 млн лет назад) тектонические и вулканические процессы распространились вдоль северо-северо-восточной зоны, протянувшейся на 230 км от Еравнинской депрессии до северо-западной части будущего Витимского вулканического поля (до ключа Куларикта). Кулисообразное расположение впадин вдоль зоны магмопроницаемости свидетельствует о ее активности как правосторонней зоны трансенсии.

В начале миоцена (около 21 млн лет назад) обстановка изменилась. Лавы и осадки распространились на территории Амалатского плато и юго-восточнее его, в Хушиндинской и, возможно, других палеодолинах (к примеру, Джидотойской). Характер смещения вулканизма 21–18 млн лет назад отражал фазу растяжения коры в раздвиговом Баргузин-Северобайкальском сегменте. Растяжение было рассредоточено на обширной территории. В интервале 16–15 млн лет назад образовался свод Антасе и резко активизировалась глубинная эрозия в его окружении. Эволюция вулканизма на Витимском поле в диапазоне 16.0–0.6 млн лет назад была обусловлена активностью субмеридионального трансенсионного Ципа-Муяканского сегмента в противофазе с эво-

люцией вулканизма на Удоканском поле в последние 14 млн лет, которая контролировалась развитием субширотного трансенсионного Муя-Удоканского сегмента. Рель-Верхнеангарский трансенсионный сегмент, сочленяющийся с Северо-Байкальской впадиной, был авулканичным.

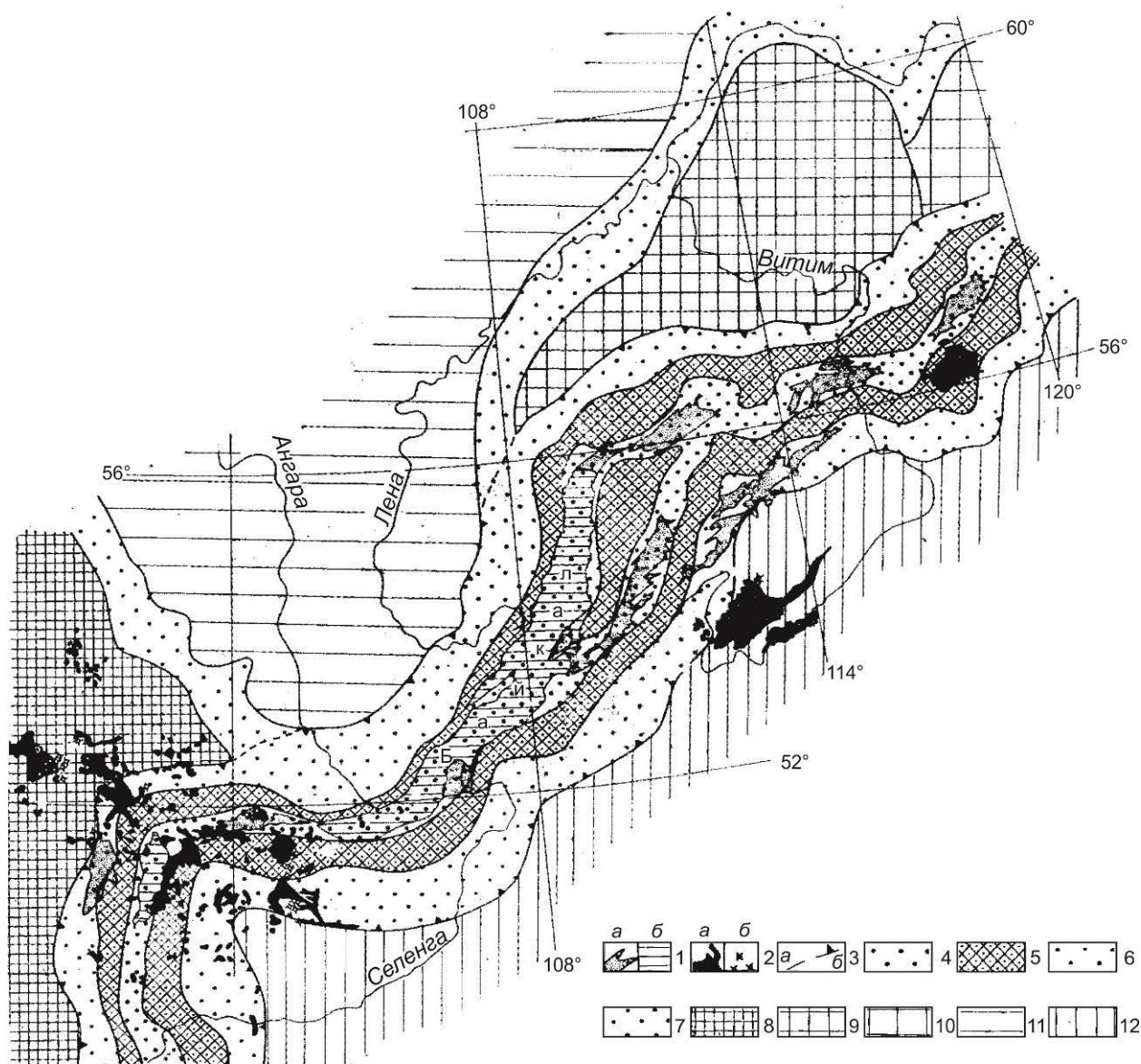
Гипотеза о сегментном строении БРС служила базисом для гипотезы о Японско-Байкальском геодинамическом коридоре (Chuvashova et al., 2017).

#### *Поперечная зональность в БРЗ*

О поперечной зональности строения Байкальской полосы поднятий и впадин писали Е.В. Павловский (1948а) и Н.А. Флоренсов (1960). Позже поперечная зональность была дополнена А.Г. Золотаревым предрифтовыми прогибами. Эта гипотеза нашла выражение в схеме неотектонического районирования БРЗ (рис. 14).

Вслед за Е.В. Павловским (1948а), который рассматривал сводовые поднятия и прогибы как антиклинальные и синклинальные складки, Н.А. Флоренсов (1960) дал такую же интерпретацию переходу от зоны опускания Тункинской долины к поднятию Хамар-Дабана. При изучении глубинных включений из лав Юго-Западного Прибайкалья, расположенным по латерали Тункинской долины на ее южном фланге, в трех местонахождениях хр. Хамар-Дабан (р. Марта, Маргасанская сопка и вулкан Тумусун) были охарактеризованы акцессорные полевые шпаты, представленные непрерывным спектром от плагиоклаза An<sub>50</sub> до калиевого щелочного полевого шпата Or<sub>65</sub>.





**Рис. 14.** Неотектоническое районирование БРЗ (Геология..., 1984). 1 – сухопутные (а) и озерные (б) рифтогенные впадины; 2 – кайнозойские базальтовые покровы (а) и вулканы (б); 3 – границы неоструктурных районов (а) и БРЗ (б); 4 – рифтогенный желоб; 5 – пред- и внутририфтовые поднятия; 6 – предрифтовые прогибы; 7 – предгорные прогибы; 8 – система поднятий Восточного Саяна; 9 – Байкало-Патомское поднятие; 10 – неотектонические структуры на древнем Алданском щите; 11 – низкая Сибирская кайнозойская «плита»; 12 – высокая Забайкальская кайнозойская «плита». Схема составлена К.Г. Леви.

**Fig. 14.** Neotectonic zoning of the Baikal rift zone (Geology..., 1984). 1 – land (a) and lake (b) rift basins; 2 – Cenozoic basaltic covers (a) and volcanoes (b); 3 – boundaries of the neostuctural regions (a) and the Baikal rift zone (b); 4 – riftogenic trough; 5 – pre- and intrarift elevations; 6 – pre-rift foredeep; 7 – foot-mountain foredeep; 8 – system of uplifts in Eastern Sayans; 9 – Baikal-Patom uplift; 10 – neotectonic structures on the ancient Aldan Shield; 11 – low Siberian Cenozoic «plate»; 12 – high Trans-Baikal Cenozoic «plate». The scheme was compiled by K.G. Levy.

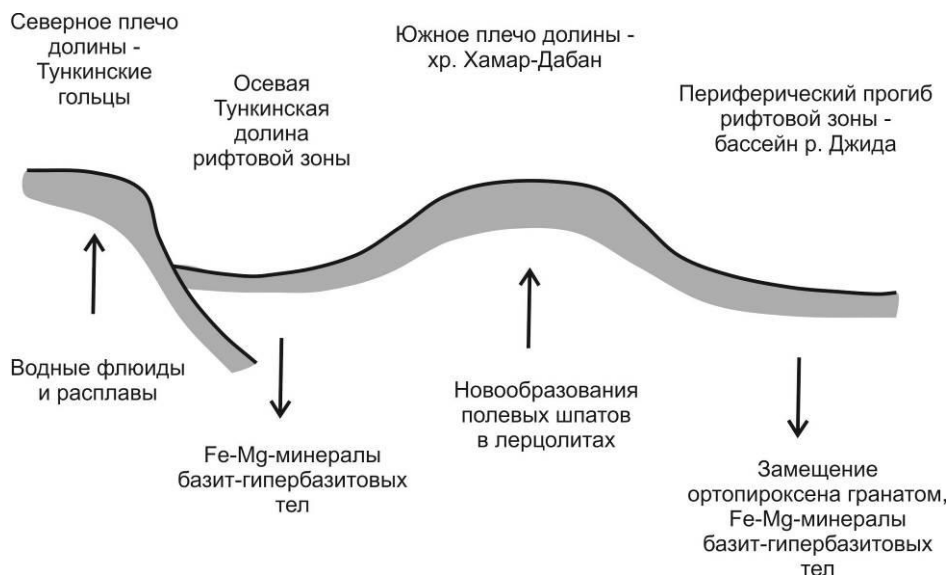
В южных отрогах хр. Хамар-Дабан гранат-содержащие включения распространены на четвертичных вулканических конусах и в лавовых потоках бассейна р. Джиды. В ксе-

нолитах зеленых лерцолитов обнаружено обрастание ортопироксена каемками новообразованного граната. Подобно вулканическим породам осевой Тункинской долины, в

вулканических породах этой территории находятся преимущественно черные глубинные включения, сложенные Fe–Mg-минералами.

Указанная субмеридиональная смена состава глубинных включений свидетельствует о развитии процессов в породах литосферы под осевой Тункинской долиной, сопредельным Хамардабанским поднятием и периферическим Джидинским прогибом в

единой структуре БРЗ. Опускание в осевой долине связано с наличием в коре базит–гипербазитовых тел, сложенных тяжелыми Fe–Mg-минералами, поднятие – с разуплотнением малоглубинных мантийных пород с новообразованием легкого полевого шпата, а прогибание периферии рифтовой зоны – с уплотнением мантийных пород, обусловленным новообразованием граната и эффектом тяжелых Fe–Mg-минералов (рис. 15).



**Рис. 15.** Схема распределения новообразованных минералов коры и подкоровой мантии, обеспечивающих разуплотнение с поднятием горного сооружения и, наоборот, уплотнение с образованием зоны опускания в структуре Тункинского сегмента (Юго-Западное Прибайкалье) (Чувашова, Рассказов, 2014).

**Fig. 15.** Distribution pattern of newly formed minerals of the crust and sub-crustal mantle, ensuring decompaction with uplift of the mountain structure and, conversely, compaction with the formation of a subsidence zone in the structure of the Tunka segment (Southwestern Baikal region) (Chuvashova, Rasskazov, 2014).

### Определение Байкальской рифтовой системы

По результатам бурения на Витимском плоскогорье были трассированы погребенные речные долины глубиной до 500 м, заполненные осадочными отложениями и вулканическими породами, одновозрастными накоплениям танхойской и ановоской свит во впадинах байкальского типа. Территория за структурно-геоморфологической границей БРЗ оказалась глубоко расчлененной речными долинами одновременно с эрозийным расчленением территории БРЗ. Предположение о медленных вертикальных движениях на территории БРЗ в танхойское время и ускоренных движениях в ановоское время (Логачев, 1974) не подтвердилось. По

распределению датированных вулканических пород в вершинных ярусах рельефа эрозионные палеодолины реконструировались начиная с интервала 20–18 млн лет назад. Обозначился импульсный характер поднятия и эрозионного расчленения территории БРЗ и сопредельных районов Витимского плоскогорья и Восточного Саяна.

Стало ясно, что территории Витимского плоскогорья и Восточного Саяна были активизированы так же, как территория БРЗ, но находились за ее пределами, поэтому автоматическое включение этих территорий в БРЗ внесло бы путаницу. Распространение вулканизма и осадконакопления в эрозионном рельефе и впадинах за принятыми в 1960–1980-х гг. структурно-

геоморфологическими границами БРЗ привели к необходимости обозначения более обширной территории под новым названием «Байкальская рифтовая система». Эта структура включала БРЗ в качестве осевой структуры и сопредельные с ней районы, охваченные вулканизмом и новейшими тектоническими движениями (Рассказов, 1993). В последующих работах по датированию вулканических пород было выявлено импульсное и разновременное поднятие горных хребтов БРС (Рассказов и др., 2000, 2007).

Установленные коренные различия в характере компонентного состава вулканических пород северо-восточной и юго-западной частей БРС приводят к выводу о разном характере развития структуры в северо-восточной, центральной и юго-западной частях БРС. По согласованному развитию вулканизма Витимского и Удоканского полей северо-восточная и центральная части БРС рассматриваются как собственно Байкальская рифтовая зона. Развитие юго-западной части БРС, на которой сосредоточены многочисленные вулканические поля, лишь частично согласуется с развитием центральной и северо-восточной частей БРС. Эта часть характеризуется как отдельная составляющая БРС – Хангай-Бельская орогенная зона с рифтовыми сегментами (Рассказов, Чувашова, 2018).

#### *Зоны аккомодации в БРС*

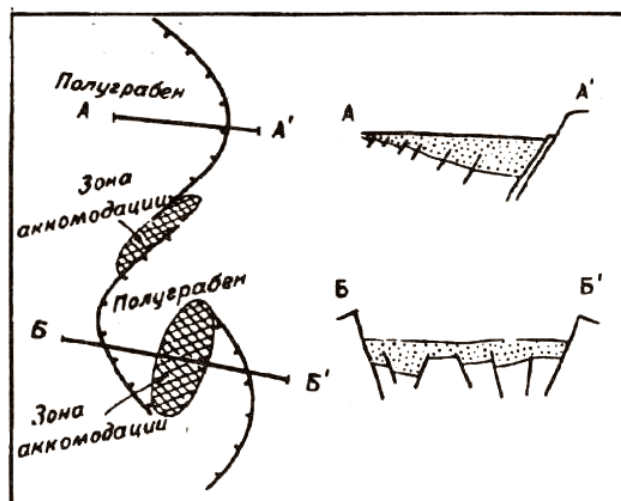
Хотя на Земле нельзя найти какие-либо две похожие между собой континентальные рифтовые зоны, они характеризуются общими чертами: образованием сбросов по бортовым разломам впадин с подчиненной ролью сдвигов, утонением литосферы под впадинами, сопровождающимся растягиванием коры, различной степенью проявления щелочного и толеитового вулканизма и повышенным тепловым потоком.

Одним из показателей континентальных рифтовых зон как единого класса структур служит сходство их внутреннего строения. После модели симметричного рифта (чистого сдвига) (McKenzie, 1978), на примере провинции Бассейнов и Хребтов, была вве-

дена в употребление модель асимметричного рифта (простого сдвига) (Wernicke, 1985). Структурная асимметрия выражается в максимальном утонении коры непосредственно под осевой рифтовой долиной и смещении зоны максимального утонения литосферы от осевой долины по направлению погружения детэчмента основного рельефообразующего разлома. Модель предполагает ведущую роль в образовании асимметричных рифтовых впадин листрических разломов со сменной их полярности в зонах аккомодации. Наряду со структурными признаками смены полярности рифтовых сегментов в системе Рио-Гранде, такие же признаки были выявлены в Восточно-Африканской и Байкальской рифтовых системах (Bosworth, 1987; Рассказов, 1993).

Рифты приобретают асимметрию вследствие особой роли в геометрии краевых разломов впадин пологих тектонических срывов. При смещениях по листрическим разломам и разломам типа домино блоки испытывают вращение. Изменение в асимметрии соседних рифтовых сегментов предполагает смену полярности в системе пологопадающих разрывов в зонах аккомодации (рис. 16). Закономерное чередование асимметрии впадин вдоль рифтовых зон указывает на латеральную ограниченность проникновения листрических разломов и частично определяет латеральные пределы активного развития зон аккомодации по латерали рифтов (Bosworth, 1985). Последняя закономерность ярко проявлена в Западной рифтовой ветви Восточно-Африканской рифтовой системы, но имеет второстепенное значение в рифте Рио-Гранде. В нем зоны аккомодации часто наследуют долгоживущие, контролировавшие рудогенез поперечные зоны разломов (устное сообщение Ч.Е. Чэпина в 1988 г., Университет Сокорро, США). Подобным образом Хубсугул-Бельская зона, образовавшаяся по краевому шву Тувино-Монгольского массива с рифейским фундаментом, отделила в Байкальской рифтовой системе западную часть со свойственными ей структурами растяжения.





**Рис. 16.** Два типа зон аккомодации в Западной ветви Восточно-Африканской рифтовой системы, по С. Сандер, Б.Р. Розендалю и Т.Д. Спект, Б.Р. Розендалю (Delvaux, 1990).

**Fig. 16.** Two types of accommodation zones in the Western branch of the East African Rift system, after S. Sander, B.R. Rosendahl and T.D. Specht, B.R. Rosendahl (Delvaux, 1990).

Подобно другим рифтовым системам, Байкальская разделяется зонами аккомодации на чередующиеся сегменты. Если в системах Восточной Африки и Рио-Гранде сегменты с меняющейся полярностью приблизительно равнозначны, в Байкальской преимущественно выражена структурная асимметрия с крутым северным, северо-западным или западным бортом и, соответственно, пологим южным, юго-восточным или восточным (сегменты Хубсугул-Тункинский, Окинский, Баргузин-Северобайкальский, Чарский). В разделяющих их сегментах либо слабо показана обратная асимметрия (сегменты Ципа-Муяканский, Верхнеокинский, Тоджинский), либо асимметрия не имеет явного выражения (сегменты Южно-Байкальский, Рель-Верхнеангарский, Муя-Удоканский). Последние два сегмента образуют вместе с Ципа-Муяканским сегментом сопряженную трансензионную группу структур (Расказов, 1996).

Действие механизма простого сдвига модели Б. Верника обосновывалось в Байкальской рифтовой зоне на примере центральной части Тункинской долины (Расказов, 1993; Чувашова, Расказов, 2014). Она простирается субширотно и отделена от поднятия Тункинских гольцов на севере главным рельефообразующим разломом с одноимен-

ным названием. Максимальное утонение коры отражается в смещении депоцентра Тункинской впадины (~2.5 км) к ее северному борту, а максимальное утонение литосферы – в проявлении толеитовых базальтов в ее южном борту. Возраст базальтов этого типа 16–15 млн лет свидетельствует о заложении структуры простого сдвига в начале среднего миоцена.

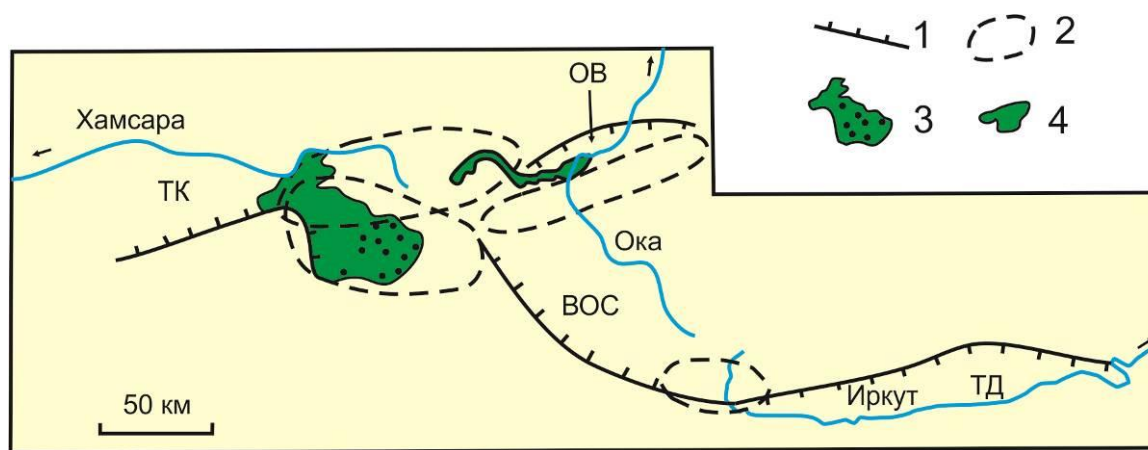
Развитие структуры Тункинской долины не было стационарным. Уже 13 млн лет назад в ее южном борту изливались щелочно-базальтовые лавы. Детэчмент Тункинского разлома оказался отчетливо выраженным в последовательном увеличении глубинности ксеногенного материала из щелочно-базальтовых лав от северного борта к южному со сменой черных коровых ксенолитов с авгитом зелеными ксенолитами с хромдиопсидом, которые могут относиться к переходу от верхней мантии к нижней коре. Лавы с ксенолитами излились во временном интервале 11–9 млн лет назад, поэтому можно считать, что деформационный режим простого сдвига сохранялся в структуре Тункинской долины не менее 7 млн лет. Инверсия движений, начавшаяся во временном интервале второй половины позднего миоцена (8–5 млн лет назад), привела к образованию сложной системы перемычек между впадинами рифтовой долины.



В Западной ветви Восточно-Африканской системы различаются два типа зон аккомодации: между рифтовыми долинами, сочетающимися по дистали, и между долинами, частично перекрывающимися по латерали (Рассказов, 1993). Предложенная структурная интерпретация западной части Байкальской рифтовой системы включает оба типа (рис. 17). Кроме зоны аккомодации между Тункинским и Верхнеокинским сегментами, зоны первого типа выделяются между Окинской и Тоджинской котловинами, а также между Верхнеокинским сегментом и Тод-

жинской котловиной. Зона аккомодации второго типа расположена между северо-западным окончанием Верхнеокинского сегмента и восточным – Окинской впадины.

В качестве зоны аккомодации рассматривалась дельта Селенги (Scholz, Hutchinson, 2000). Однако употребление этого термина в данном случае не пояснялось. Тектонического смысла смены полярности разломов в бортах соседних впадин в этом случае не наблюдалось, поскольку эта территория находится в центральной части единой Южно-Байкальской впадины.



**Рис. 17.** Зоны аккомодации и вулканические поля в западной части Байкальской рифтовой системы (Рассказов, 1993). 1 – крутой борт полуграбена; 2 – зона аккомодации; 3 – Восточно-Тувинское вулканическое поле и распределение плиоцен-четвертичных вулканов; 4 – голоценовый Жомболковский поток. Обозначения структур: ТК – Тоджинская котловина; ОБ – Окинская впадина; ВОС – Верхнеокинский рифтовый сегмент; ТД – Тункинская долина.

**Fig. 17.** Accommodation zones and volcanic fields in the western part of the Baikal rift system (Rasskazov, 1993). 1 – steep slope of half-graben; 2 – accommodation zone; 3 – East Tuva volcanic field and distribution of the Pliocene-Quaternary volcanoes; 4 – Holocene Zhombolok flow. Designations of structures: ТК – Todzha basin; ОБ – Oka basin; ВОС – Upper Oka rift segment; ТД – Tunka valley.

### Гипотезы нового тысячелетия

Новейшие гипотезы пока не ушли в историю. Текущий прогресс в понимании условий образования Байкальской системы впадин в значительной мере связан с изучением вулканизма (Чувашова, Рассказов, 2023). Поддерживая общее изложение истории развития представлений о строении БРС, мы подчеркиваем здесь значение гипотез 1) об образовании радиальных впадин Хубсугульского сегмента во фронте Хангайского орогена (2012 г.) и 2) о Японско-Байкальском геодинамическом коридоре (ЯБГК) (2017 г.). Кроме того, для понимания современного состояния впадины Южного Байкала пер-

спективна разработка гипотез 1) о миграции глубинной воды Южно-Байкальского резервуара под побережье оз. Байкал (2020 г.) и 2) о проявлении сейсмогеодинамической цикличности сжатия и растяжения в центральной части БРС (2022 г.).

### Образование радиальных впадин Хубсугульского сегмента во фронте Хангайского орогена

Сходство неотектонических условий в орогенах Центральной Азии с условиями в Гималайско-Тибетском орогене вытекает из анализа данных о глубинном строении этих структур. Территории Гималайско-Тибетской и восточной части Центрально-

Азиатской орогенных систем характеризуются утолщенной корой (соответственно, до 74 и 60 км). Область орогенеза отделена от области растяжения континентальной окраины востока Азии с утоненной корой (<40 км) переходной зоной с нормальной толщиной коры (40–45 км). К переходной зоне относятся Ордосский и Сычуанский блоки, а также западная часть Амурского блока (Чувашова, Рассказов, 2014).

В качестве радиальных (по отношению к сопредельному орогену) рассматриваются Хубсугульский, Дархатский и Бусийн-Гольский рифты Северной Монголии. Рифтам соответствуют впадины, названные Н.А. Флоренсовым (1960) «впадинами-подвесками». Они располагаются по северному фронту поднятия Хангайского нагорья, восточнее которого протягивается поднятие хр. Восточный Хангай и опускание Орхон-Селенгинского среднегорья. Последнее разделяет поднятия Хамар-Дабана и Восточного Хангая. В среднегорье формировалась Центрально-Монгольская система впадин, к которой относятся и впадины субмеридиональной Чулутынской зоны, отделяющей Хангайское нагорье от хр. Восточный Хангай и Орхон-Селенгинского среднегорья. Кулисное расположение хребтов и межгорных впадин между Центральным и Восточным Хангаем свидетельствует о правосторонних смещениях вдоль Чулутынской зоны. Сопряженный характер деформаций коры Восточного Хангая и Хубсугул-Бусийнгольского рифтового сегмента проявляется в импульсах противофазного проявления вулканизма этих структур (Рассказов и др., 2012; Рассказов, Чувашова, 2018; Чувашова, Рассказов, 2023).

#### *Японско-Байкальский геодинамический коридор*

Для расшифровки сил и процессов, проявившихся в расплавных аномалиях литосферы и подлитосферной мантии Азии в результате ее взаимодействия с литосферными плитами Тихого океана на новейшем геодинамическом этапе было введено понятие «Японско-Байкальский геодинамический коридор», под которым понимается ограниченная по латерали подвижная полоса лито-

сферы и подлитосферной мантии Центральной и Восточной Азии, подверженная воздействию сил и процессов новейшего геодинамического этапа и характеризующаяся действием силы затягивания материала от периферии коридора к его оси (Chuvashova et al., 2017).

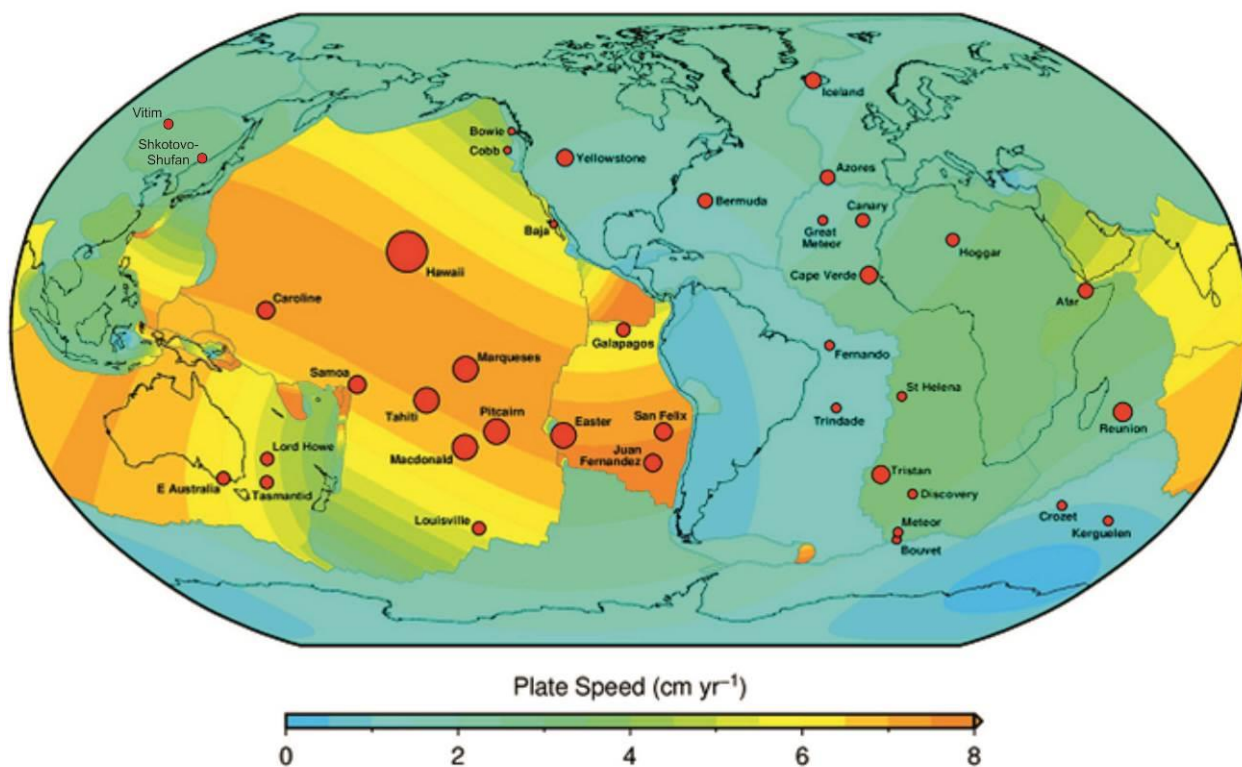
В терминах флюидной механики силы астеносферной части геодинамического коридора описываются слоем флюида в канале (Turcotte, Schubert, 2014). В понятие геодинамического коридора включаются расплавленные аномалии, производные слоев астеносферы и литосферы его внутренних частей.

Геодинамический коридор протягивается от зоны задугового спрединга Японского моря во внутреннюю часть Азии и характеризуется латеральными ограничениями, за которыми скорость движений вдоль него равна нулю. Максимальная скорость движения материала создается вдоль оси коридора. К краям коридора и вдоль него скорость движения уменьшается. По встречному движению стабильной Азии и Тихоокеанской плиты (азимут 300°) основное направление геодинамического коридора определяется как запад-северо-западное – восток-северо-восточное. Относительное увеличение скорости движения материала выражается в возникновении сил его затягивания от периферии к оси. При запад-северо-западном простираии коридора такие силы приводят к образованию субмеридиональных и субширотных зон трансенсии в литосфере. Разрывы растяжения в зонах трансенсии ориентируются в целом по направлению минимального тектонического напряжения, создающегося силой затягивания, и должны простираиться в идеальном случае на северо-северо-восточном фланге коридора – на северо-восток и на юго-юго-западном фланге – на северо-запад.

Через ЯБГК обеспечивается связь новейшей геологической эволюции Байкальского региона с эволюцией Япономорского задугового бассейна и движениями литосферы и подлитосферной мантии в Тихоокеанском регионе. Латеральное изменение скорости движения литосферных плит и оценки потоков плавучести мантии, полученные по скоростям, свидетельствуют о том, что обшир-

ная Тихоокеанская плита и сопредельные малые литосферные плиты не обладают жесткостью и подвергаются деформациям. Максимальная скорость движения Тихоокеанской плиты ( $7\text{--}8\text{ см год}^{-1}$ ) обеспечивается мантийной конвекцией в полосе, пространственно соответствующей горячим пятнам с высокой плавучестью (Гавайскому, Самуа, Каролинской, Маркизскому, Таити, Питкэрн, Макдональд и Истер). К северному и южному краям Тихоокеанской плиты скорость ее движения снижается.

Подобная связь между процессами глубокой мантии и деформациями литосферы наблюдается в ЯБГК. Наиболее существенное (встречное по отношению к Тихоокеанской плите) смещение на 300 км в осевой части этого геодинамического коридора за последние 15 млн лет устанавливается по соотношению Шкотово-Шуфанского и Витимского вулканических полей и корневых частей расплавных аномалий, обозначенных локальным снижением скоростей S-волн на глубине 250–300 км (рис. 18).



**Рис. 18.** Модель движения плит NNR-MORVEL56 (Argus et al., 2011). Красные круги (37 горячих пятен) масштабируются в соответствии с потоками плавучести по скоростям движения плит. Приведена схема из работы (Hoggard et al., 2020) с дополнением Шкотово-Шуфанской и Витимской расплавных аномалий, трассирующих осевую часть ЯБГК (без оценок плавучести), пространственно соответствующую максимальной скорости смещения Тихоокеанской плиты ( $7\text{--}8\text{ см год}^{-1}$ ).

**Fig. 18.** Plate motion model NNR-MORVEL56 (Argus et al., 2011). Red circles (37 hot spots) are scaled according to buoyancy fluxes across plate velocities. Scheme is adopted from (Hoggard et al., 2020) with the addition of the Shkotovo-Shufan and Vitim melting anomalies tracing the axial part of the JBGK (without estimates of buoyancy fluxes), spatially corresponding to the maximum displacement rate of the Pacific plate ( $7\text{--}8\text{ cm year}^{-1}$ ).

#### *Миграция глубинной воды Южно-Байкальского резервуара под побережье Байкала*

При исследованиях подземного стока в оз. Байкал было установлено, что сток с окружающих территорий имеет место до

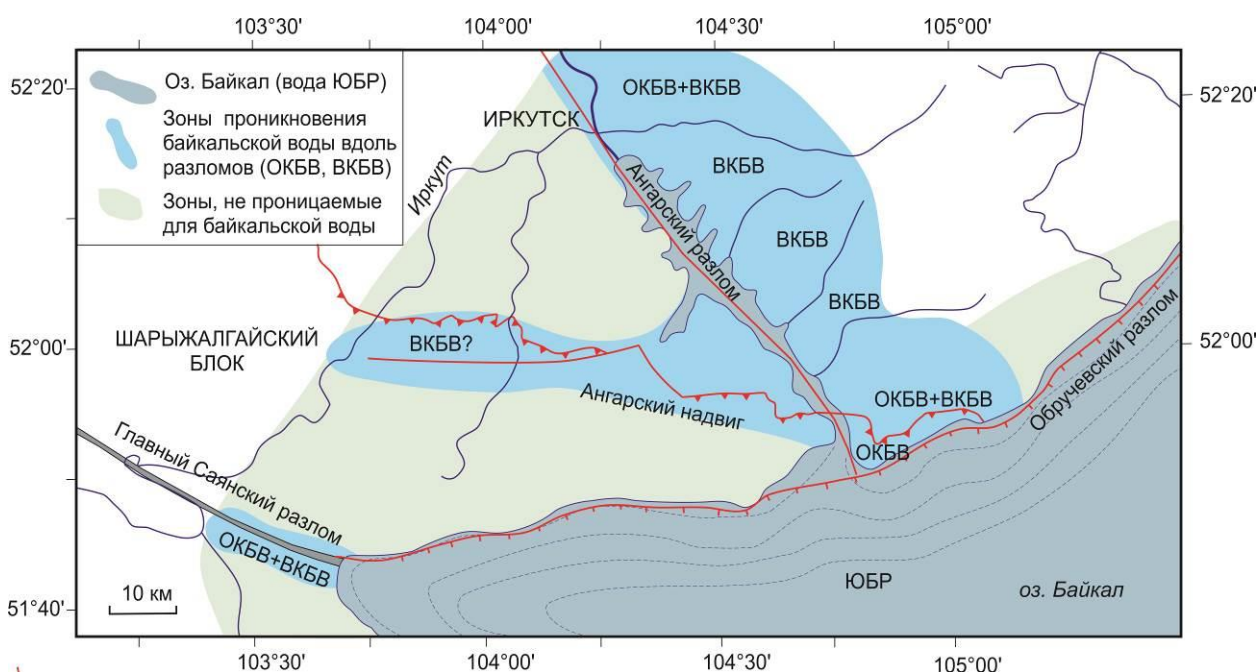
глубины 250 м. На больших глубинах подземный сток в озеро предотвращается гидростатическим давлением (Пиннекер и др., 1968). Если это так, то вода более глубокой части озера может, наоборот, проникать под прибрежные территории. Чтобы определить



эффект обратного движения вод из озера под побережье, нужен маркер.

Для глубинной воды Южно-Байкальского резервуара (ЮБР) определены характерные значения ОА4/8 и концентрации U (соответственно, 1.95–1.99 и 44–46  $\mu\text{дм}^3$ ), которые использовались в качестве маркеров глубинного водообмена озера с территорией его побережья со стороны Сибирского палеоконтинента. Гидрогеохимические признаки глубинной южно-байкальской воды выявлены в зонах разломов, ослабленных при рифтогенезе. Вода ЮБР проникала по пологим разрывам Ангарского надвига в береговые породы фундамента Листвянской и

Большекотовской зон и юрские отложения Ангарских Хуторов, а также в юрские отложения гидрогеохимических зон Большереченской и Радищево. Возможно, компонент ЮБР входил также вдоль зоны Ангарского надвига в породы платформенного фундамента Огоньковской зоны. Наряду с берегами, проводящими глубинные воды ЮБР, установлены берега, не проницаемые для глубинных вод оз. Байкал. В таких берегах трещины испытывают сжатие, поэтому компонент глубинной байкальской воды не примешивается к подземным водам (рис. 19).



**Рис. 19.** Схема проникновения воды ЮБР вдоль разломов Иркутского Предбайкалья (Расказов и др., 2020). ЮБР – Южно-Байкальский резервуар. ВКБВ – восстановленный компонент байкальской воды (с низкой концентрацией U). ОКБВ – окисленный компонент байкальской воды (с высокой концентрацией U).

**Fig. 19.** The scheme of the ЮБР water penetration along faults of the Irkutsk Prebaikalia (Rasskazov et al., 2020). ЮБР – South Baikal reservoir. ВКБВ – reduced component of Baikal water (with a low concentration of U). ОКБВ – oxidized component of Baikal water (with a high concentration of U).

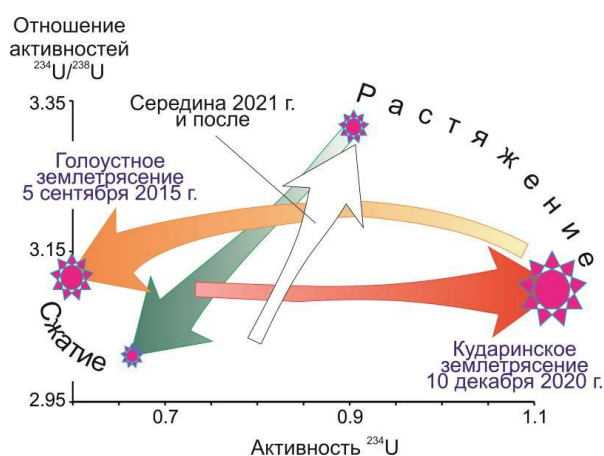
Выявление маркера ЮБР открывает возможность исследования гидрогеодинамики берегов оз. Байкал по всему периметру с определением прибрежных зон растяжения и сжатия.

### *Сейсмогеодинамическая цикличность сжатия и растяжения коры в центральной части БРС*

Важнейшее направление текущих работ в БРС – поиск путей прогноза современных сейсмогенных деформаций с определением времени и места сильных землетрясений. Квазипериодичность сейсмических активизаций, выводящих на сильные землетрясе-



ния, установлена в западной части Южно-Байкальской впадины по пространственно-временному распределению эпицентров землетрясений. Наиболее сильные землетрясения произошли в 1999 г. (Южно-Байкальское,  $M_w = 6.0$ ), в 2008 г. (Култукское,  $M_w = 6.3$ ) и в 2020 г. (Кударинское,  $M_w = 5.4$ ). С 2013 г. на Култукском полигоне проводился мониторинг отношения активностей  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  (A4/8) и активности  $^{234}\text{U}$  (A4) в подземных водах как показателя раскрытия/закрытия трещин, способствующего/препятствующего циркуляции воды в активных разломах впадины. По результатам мониторинга определен полный сейсмогеодинамический цикл смены сжатия коры растяжением с последовательным возрастанием уровней сейсмической опасности (рис. 20) (Rasskazov et al., 2022).



**Рис. 20.** Реконструкция полного сейсмогеодинамического цикла по результатам мониторинга подземных вод ст. 27 Култукского полигона (Rasskazov et al., 2022). Сейсмическим стадиям соответствуют тренды последовательного изменения  $OA4/8$  и  $A4$  в подземных водах с выходом на экстремальные значения, соответствующие сильным сейсмическим событиям. Слабые неопасные землетрясения 2013–2014 гг. (зеленый уровень) сменялись нарастанием опасности желто-оранжевого уровня в 2015 г. при сжатии и красным уровнем сейсмической опасности в конце 2020 г. при растяжении с последующим выходом в новый сейсмогеодинамический цикл (к состоянию 2013 г.).

**Fig. 20.** Reconstruction of the complete seismogeodynamic cycle in the crust from monitoring results in the station 27 of the Kultuk polygon (Rasskazov et al., 2022). Seismic stages correspond to trends in successive change in  $OA4/8$  and  $A4$  in groundwater

that reach extreme values corresponding to strong seismic events. Weak non-hazardous earthquakes in 2013–2014 (green level) were followed by an increase of danger in 2015 in a yellow-orange level under compression and by the further development of hazardous state in late 2020 – early 2021 in a red level under extension with subsequent exit to the new seismogeodynamic cycle (to the state of 2013).

В 2013–2014 гг. происходили слабые землетрясения зеленого уровня сейсмической опасности. Снижение  $OA4/8$  и  $A4$  в подземных водах свидетельствовало об относительном снижении роли фактора растяжения коры и возрастании роли сжатия. Резкое возрастание  $A4$  28 мая 2014 г. перешло в тренд последовательного снижения этого параметра, на минимуме которого 5 сентября 2015 г. случилось Голоустное землетрясение средней силы. Также, как в 2013–2014 гг. сейсмогенерирующие растягивающие напряжения коры снижались, но в реализации Голоустного землетрясения в ходе сейсмогеодинамического цикла достигалось минимальное растяжение коры.

В дальнейшем характер подготовки землетрясений изменился. 2 декабря 2015 года значения  $OA4/8$  и  $A4$  в подземных водах еще оставались на минимуме. Но в течение последующих 5 лет после Голоустного землетрясения оба параметра последовательно возрастали. Тренд соответствовал красному уровню сейсмической опасности. 9 декабря 2020 г. в дельте Селенги произошло сильное Кударинское землетрясение, которому предшествовало (в качестве спускового механизма) Быстринское землетрясение 22 сентября 2020 г., и за которым последовало сильное Хубсугульское землетрясение 12 января 2021 г.

Кударинское землетрясение 9 декабря 2020 г. завершило сейсмогеодинамический цикл, начавшийся с реализации Култукского землетрясения 27 августа 2008 г. Установившиеся высокие значения  $OA4/8$  и  $A4$  в подземных водах свидетельствуют о выходе на максимум растягивающих усилий в коре осевой части Японско-Байкальского геодинамического коридора. Последующие (спровоцированные) хубсугульские сейсмические события обозначили включение сжимающего механизма компенсации кударинского

растяжения коры. К 24 декабря 2020 г. значения ОА4/8 и А4 в подземных водах Култукского полигона снизились до средних уровней. С 15 июня 2021 г. проявилась тенденция возрастания обоих параметров, которая свидетельствовала об усилении фактора растяжения коры. Также, как перед Кударинским событием, сейсмогенерирующие растягивающие напряжения коры возрастили, но по тренду существенного смещения значений А4. Нарастал импульс растяжения коры, не похожий на экстремальную кударинскую фазу. Направленность к началу зеленого тренда 2013-2014 гг. может интерпретироваться как свидетельство перехода к развитию нового сейсмогеодинамического цикла.

### Обсуждение

Прежде чем новая гипотеза принимается геологами, проходит ее тестирование с разных точек зрения. Если она удовлетворяет независимым фактам, то используется как само собой разумеющееся знание. Байкальская система поднятий и впадин (Павловский, 1948а) вошла в мировую геологическую литературу как Байкальская рифтовая зона в ее структурно-геоморфологических границах с атрибутами растяжения и утонения коры (Логачев, 1977; Florensov, Logatchev, 1978; Logatchev, Zorin, 1992). Благодаря сравнительному изучению рифтовых зон международными исследовательскими группами она получила статус одной из классических кайнозойских рифтовых зон, развитых на континентах. При изучении вулканизма стало очевидным, однако, более широкое распространение структур Байкальской полосы поднятий и впадин за пределы ее геоморфологических очертаний, поэтому был введен новый термин «Байкальская рифтовая система» (Рассказов, 1993). Прогресс в изучении БРЗ, а затем БРС, был достигнут благодаря систематическим разноплановым работам Иркутской научной школы Н.А. Логачева «Кайнозойский континентальный рифтогенез».

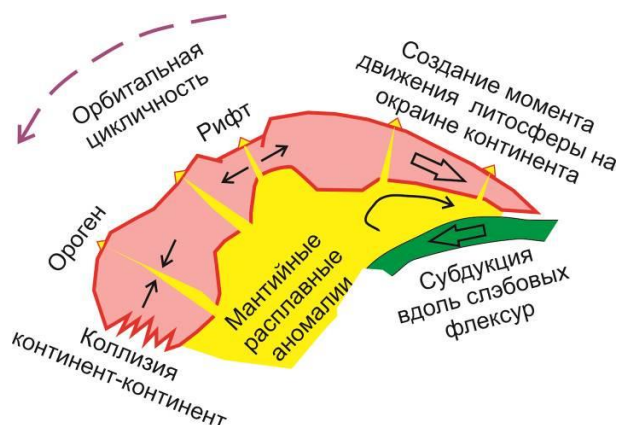
Взгляд иностранных геологов на состояние изученности БРЗ в отчете по международной программе «Литосфера» в виде компилятивной главы (Keller et al., 1995) пока-

зал ограниченные представления, основанные на списке статей, опубликованных на английском языке. В основу главы отчета о БРЗ было положено сообщение первого автора Рэнди Келлера, которое он сделал на научной сессии в Университете Сокорро (штат Нью-Мексико, США) во время экскурсионной поездки советской делегации по рифту Рио-Гранде в 1988 г. в рамках дискуссии о сходстве и отличиях рифтовых структур Рио-Гранде и Байкальской. Из других авторов этой главы, только Пол Морган был участником совместных работ (Intracontinental rift..., 1989). Поверхностное изложение материалов главы Р. Келлером и др. дополнялось вольной трактовкой границ новейших структур и другой сомнительной информацией.

Систематические исследования вулканизма новейшего геодинамического этапа и его источников в БРС и на сопредельных территориях способствовали пониманию процессов, развивающихся в ЯБГК, и открыли возможность оценки степени влияния на процессы Внутренней Азии Индо-Азиатской конвергенции (Чувашова, Рассказов, 2023). Общая идея о таком влиянии была высказана Эмилем Арганом в 1923 г., представлялась как новая гипотеза П. Молнар и П. Таппонье (Molnar, Tarponier, 1975) и к настоящему времени получила всестороннюю аргументацию.

Объем новой информации по Байкальской системе впадин постоянно растет, однако, для того чтобы этот рост привел к новым гипотезам и открыл новые грани характера новейших геологических процессов, необходимо понимание истоков существующих ныне представлений и степень их аргументации с тем, чтобы определить в дальнейших исследованиях подходы, которые действительно могут обеспечить качественно новые выводы. Гипотеза о ЯБГК как факторе геодинамического контроля процессов, происходящих в литосфере и подлитосферной мантии Внутренней Азии со стороны Тихого океана, существенно расширяет возможности получения качественно новой интерпретации новейших структур, включая БРС. Создается новая синтетическая теория сложной пространственно-временной де-

формации литосферы Азии под действием нескольких силовых факторов, которые в целом регулируются силами, генерирующимися вследствие орбитального вращения Земли (рис. 21).



**Рис. 21.** Главные силовые факторы, воздействовавшие на литосферу Азии на новейшем геодинамическом этапе.

**Fig. 21.** The major force factors affected the lithosphere of Asia in the latest geodynamic stage.

### Заключение

Первоначальное геоморфологическое трассирование структуры в виде Байкальской системы впадин, которые рассматривались на фоне горных сооружений как результат сжатия коры (Павловский, 1948а,б), сменилось гипотезой геоморфологического определением полосы поднятий и впадин как рифтовой зоны, явившейся результатом ее растяжения (Флоренсов, 1960; Логачев, 1974, 1977), и было дополнено гипотезой о более обширном развитии кайнозойских деформаций коры в БРС, включающей территории за структурно-геоморфологическими границами БРЗ (Рассказов, 1993). Следующий существенный шаг был сделан, когда были представлены факты, свидетельствующие об интеграции БРС в структуру ЯБГК (Chuvashova et al., 2017), которой обеспечивается связь новейшей геологической эволюции Байкальского региона с эволюцией Япономорского задугового бассейна и движениями литосферы и подлитосферной мантии в Тихоокеанском регионе.

При систематических исследованиях кайнозойского континентального рифтогенеза и связанных с ним расплавных аномалий представления о рифтогенезе менялись от

его упрощенного восприятия как корового процесса к восприятию как процесса, протекающего в континентальной литосфере и под ней с многовариантной эволюцией в зависимости от строения фундамента, проявления, наряду с растяжением, сжатия литосферы, создания условий для реализации простого или чистого сдвига.

В настоящее время БРС воспринимается как классическая внутриконтинентальная рифтовая структура, состоящая из трансформационных и раздвиговых сегментов, контролирующей вулканическую деятельность. Развитие БРС не было монотонным. Разнообразные осложнения структуры обозначились в гипотезах, часть из которых не выдержала испытания временем, а другая часть поддерживается, но не исключено, что в будущем гипотезы, которые в настоящее время поддаются логике, будут переосмыслены и заменены новыми гипотезами, лучше объясняющими полученные фактические материалы.

### Благодарности

Исторический обзор гипотез проводится в связи с разработкой курса «Геология и стратиграфия кайнозоя Сибири».

### Литература

Аль Хамуд А., Рассказов С.В., Чувашова И.С., Трегуб Т.Ф., Волков М.А., Кулагина Н.В., Коломиец В.Л., Будаев Р.Ц. Временные вариации состава кайнозойских отложений на Танхойской тектонической ступени Южного Байкала // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 30. С. 108–129. doi.org/10.26516/2073-3402.2019.30.108

Аль Хамуд А., Рассказов С.В., Чувашова И.С., Трегуб Т.Ф., Рубцова М.Н., Коломиец В.Л., Будаев Р.Ц., Хассан А., Волков М.А. Опрокинутая эоцен-нижнеплиоценовая аллювиальная толща на южном берегу оз. Байкал и ее неотектоническое значение // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12, № 1. С. 139–156.

Аносов В.С. Некоторые данные о древней речной сети в Юго-Западном и Центральном Прибайкалье // Новые данные по геологии, нефтегазоносности и полезным ископаемым Иркутской области. М.: Недра. 1964. С. 247–251.

Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. Мгновенные скорости дивергенции Евразийской и Амурской плит на байкальской межплитной границе // Кайнозойский континентальный рифтогенез. Мат-лы симпозиума, посвященного 80-летию со дня рождения академика Н.А. Логачева. Т. 1. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. С. 53–56.

Байкал. Геология. Человек / М.И. Грудинин, И.С. Чувашова (составители). Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. 239 с.

Балла З., Кузьмин М.И., Леви К.Г. Кинематика раскрытия Байкала // Геотектоника, 1990. № 2. С. 80–91.

Белов И.В. Трахибазальтовая формация Прибайкалья. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 371 с.

Вотинцев К.К., Глазунов И.В., Толмачева А.П. Гидрохимия рек бассейна озера Байкал. М., Наука, 1965. 495 с.

Грудинин М.И., Меньшагин Ю.В. Ультрабазит–базитовые ассоциации раннего докембрия. Новосибирск: Наука, 1987. 157 с.

Гурулев С.А. О возрасте оледенения в Северном Прибайкалье // Труды Вост.-Сиб. геол. ин-та ВСФ АН СССР. Иркутск, 1959. Вып. 2. С. 175–186.

Девирц А.Л., Рассказов С.В., Поляков А.И., Добкина Э.И. Радиоуглеродный возраст молодых вулканов хребта Удокан (Северо-Восточное Прибайкалье) // Геохимия. 1981. № 8. С. 1250–1253.

Замараев С.М., Самсонов В.В. Геологическое строение и нефтегазоносность Селенгинской депрессии // Геология и нефтегазоносность Восточной Сибири. М.: Гостоптехиздат. 1959. С. 435–475.

Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А., Мишарина Л.А., Солоненко Н. Тектоника плит Байкальской горной области и Станового хребта. Доклады АН СССР. 1978. Т. 240, № 3. С. 669–672.

Зорин Ю.А., Корделл Л. Растяжение земной коры в Байкальской рифтовой зоне по гравиметрическим данным // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1991. № 5. С. 3–11.

Еникеев Ф.И., Потемкина В.И. Поздний кайнозой Чарской впадины // Актуальные проблемы палинологии на рубеже третьего тысячелетия. М.: ИГиРГИ, 1999. С. 105–112.

Коломиец В. Л. Седиментогенез плейстоценового аквального комплекса и условия форми-

рования нерудного сырья суходольных впадин Байкальской рифтовой зоны.: дисс. канд. геол.-мин. наук. Иркутск. 2010. 278 С.

Кононов Е.Е., Хлыстов О.М. О возрасте глубоководного Байкала // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 4. С. 11 8–1 29. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-11 8-129

Кравчинский А.Я., Давыдов В.Ф., Болдырев Г.С. Опыт палеомагнитной стратификации донных осадков оз. Байкал // Хронология ледникового века. Л.: Недра, 1971. С. 48–56.

Кузьмин М. И., Бычинский В. А., Кербер Е. В. Ошепкова А. В., Горегляд А. В., Иванов Е. В. Химический состав осадков глубоководных байкальских скважин как основа реконструкции изменений климата и окружающей среды // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 1. С. 3–22.

Ламакин В.В. Неотектоника Байкальской впадины. М.: Наука, 1968. 247 с. (Труды Геологического института, вып. 187)

Логачев Н.А. Кайнозойские континентальные отложения впадин байкальского типа // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1958. № 4. С. 18–29.

Логачев Н. А. Осадочные и вулканогенные формации Байкальской рифтовой зоны // Байкальский рифт. Новосибирск: Наука. 1968. С. 72–101.

Логачев Н. А. Саяно-Байкальское и Становое нагорья // Нагорья Прибайкалья и Забайкалья / Ред. Н.А. Флоренсов. М.: Наука. 1974. С. 16–162.

Логачев Н.А. Вулканогенные и осадочные формации рифтовых зон Восточной Африки. М.: Наука, 1977. 183 с.

Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 5. С. 391–406.

Логачев Н.А., Брандт И.С., Рассказов С.В., Иванов А.В., Брандт С.Б., Конев А.А., Ильслова А.М. Определение К–Аг-возраста палеоценовой коры выветривания Прибайкалья // Доклады АН. 2002. Т. 385, № 6. С. 797–799.

Логачев Н.А., Рассказов С.В., Иванов А.В., Леви К.Г., Бухаров А.А., Кашик С.А., Шерман С.И. Кайнозойский рифтогенез в континентальной литосфере // Литосфера Центральной Азии. Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука, 1996. С. 57–80.



Лопатин Д.В. Трансбайкальская гидросистема плейстоцена // Геоморфология. 2016. № 2. С. 113–119.

Лопатин Д.В., Томилов Б.В. Древние долины Западного Прибайкалья в связи с проблемой образования Байкала // Речные системы и мелиорация. Новосибирск, 1977. Ч.2. С. 101–103.

Лопатин Д.В., Томилов Б.В. Возраст Байкала // Вестник СПбГУ. Сер. 7, 2004, вып. 1. С. 58–67.

Лут Б.Ф., Власова Л.К., Фиалков В.А., Лещиков Ф.Н., Мирошниченко А.П., Галкин В.И., Карабанов Е.Б., Мизандронцев И.Б., Белова В.А., Логинова Л.П., Хурсевич Г.К., Компанец В.Х. Литодинамика и осадкообразование Северного Байкала. Новосибирск: Наука, 1984. 290 с.

Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Леви К.Г., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Залуцкий В.Т., Кале Э., Девершер Ж., Верноль М., Бехтур Б., Амаржаргал Ш. Новые данные о современных тектонических деформациях южного горного обрамления Сибирской платформы // Доклады АН. 2003. Т. 389, № 1. С.100–103.

Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал ГЕО, 2001. 252 с.

Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С. и др. Култукское землетрясение 2008 г. с  $M_w = 6.3$  на юге Байкала: пространственно-временной анализ сейсмической активации // Известия физики твердой Земли. 2012. Т. 48, № 7–8. С. 594–614.

Мишарина Л.А. Напряжения в земной коре в рифтовых зонах. М.: Наука, 1967. 135 с.

Мордвинова В.В., Кобелев М.М., Хритова М.А. и др. Скоростное строение южной окраины Сибирского кратона и его складчатого окружения по объемным волнам далеких землетрясений // 2017. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2017. Т. 4, № 1. С. 37–41.

Недра Байкала по сейсмическим данным / Под ред. Н.Н. Пузырева. Новосибирск: Наука. Сиб. отд.-ние, 1981. 105 с.

Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника / Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Рассказов С.В. Новосибирск: Наука, 1984. 207 с.

Павловский Е. В. Геологическая история и геологическая структура Байкальской горной области. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1948. 175 с.

Павловский Е.В., Фролова Н.В. Древние долины Лено-Ангаро-Байкальского водораздела // Бюллетень МОИП. Отд. геол. 1941. Т. XIX (1). С. 65–79.

Пальшин Г.Б. Кайнозойские отложения юго-восточного побережья Байкала. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 201 с.

Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С., Колдышева Р.Я., Диденко А.А., Шерман С.И. Гидрогеология Прибайкалья. Москва: изд-во Наука, 1968. 170 с.

Рассказов С.В. Плиоцен-четвертичный надвиг на юге Окинского плоскогорья (Восточный Саян) // Геология и геофизика. 1990. № 5. С. 134–138.

Рассказов С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1993. 288 с.

Рассказов С.В. Сопоставление вулканизма и новейших структур горячих пятен Йеллоустоуна и Восточного Саяна // Геология и геофизика. 1994. № 10. С. 67–75.

Рассказов С.В. Вулканизм и структура северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 4. С. 60–70.

Рассказов С.В. Среднеголоценовое изменение тектонических напряжений в вулканической зоне хребта Удокан, Восточная Сибирь // Вулканология и сейсмология. 1999. № 2. С. 70–74.

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Новейшая мантийная геодинамика Центральной Азии. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 308 с.

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Вулканизм и трансенсия на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 383 с. ISBN 978-5-6041446-3-3

Рассказов С.В., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Оргильянов А.И., Коваленко С.Н., Семинский А.К., Попов Е.П., Чебыкин Е.П. Гидрогеохимическая зональность изотопов урана ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) на юге Сибирского палеоконтинента: роль резервуара Южного Байкала в формировании подземных вод. Геодинамика и тектонофизика. 2020;11(3):632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>

- 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: Наука, 2000. 288 с.
- Рассказов С. В., Лямина Н. А., Лузина И. В., Черняева Г. П., Чувашова И. С., Усольцева М. В. Отложения Танхойского третичного поля, Южно-Байкальская впадина: стратиграфия, корреляции и структурные перестройки в Байкальском регионе // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. Vol. 5, No. 4. P. 993–1032.
- Рассказов С. В., Лямина Н. А., Черняева Г. П., Лузина И. В., Руднев А. Ф., Резанов И. Н. Стратиграфия кайнозоя Витимского плоскогорья: феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео». 2007. 193 с.
- Рассказов С.В., Коломиец В.Л., Будаев Р.Ц., Чувашова И.С., Аль-хамуд А., Хассан А., Алокла Р. Новейшая активизация шовной зоны Сибирского кратона под Южным Байкалом: от мелпалеогенового орогена к неоген-четвертичному рифту // *Геология и окружающая среда*. 2021. Т. 1, № 1. С. 7–15.
- Рассказов С.В., Миколайчук А.В., Коломиец В.Л., Будаев Р.Ц., Усольцева М.В., Сунь Йиминь, Сие Чжэньхуа, Янг Чэнь, Чувашова И.С., Чикишева Т.А., Хассан А., Хамуд А. Аль, Алокла Р. Кайнозойские красноцветные осадочные отложения Внутренней Азии: литогенетическое значение вариаций содержаний  $Al_2O_3$  и  $CO_2$  // *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. Материалы совещания. Выпуск 14. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2016. С. 233–235.
- Рассказов С.В., Чувашова И.С., Ясныгина Т.А., Фефелов Н.Н., Саранина Е.В. Калиевая и калинатровая вулканические серии в кайнозое Азии. Новосибирск: Академическое изд-во «ГЕО». 2012. 351 с. (Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Yasnigina T.A., Fefelov N.N., Saranina E.V. Potassic and potassic-sodic volcanic series in the Cenozoic of Asia. Novosibirsk: Academic Publishing House “GEO”. 2012. 351 p.)
- Рассказов С.В., Ясныгина Т.А., Чувашова И.С., Михеева Е.А., Снопков С.В. Култукский вулкан: пространственно–временная смена магматических источников на западном окончании Южно-Байкальской впадины в интервале 18–12 млн лет назад // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013. Vol. 4, No. 2. P. 135–168. doi:10.5800/GT2013420095.
- Решения Третьего Межведомственного регионального стратиграфического совещания по мезозою и кайнозю Средней Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981. 91 с.
- Ружич В.В., Шерман С.И., Тарасевич С.И. Новые данные о надвигах в юго-западной части Байкальской рифтовой зоны // *Докл. АН СССР*. 1972. Т. 205, № 4. С. 920–923.
- Саньков В.А., Чипизубов А.В., Лухнев А.В., Смекалин О.П., Мирошниченко А.И., Кале Э., Девершер Ж. Подход к оценке опасности сильного землетрясения в зоне Главного Саянского разлома по данным GPS-геодезии и палеосейсмологии // *Геология и геофизика*. 2004. № 11. С. 1369–1376.
- Скобло В.М., Лямина Н.А., Лузина И.В., Руднев А.Ф. Континентальный верхний мезозой Прибайкалья и Забайкалья. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 332 с.
- Солоненко В.П., Тресков А.А., Курушин Р.А. и др. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья. М.: Наука, 1966. 231 с.
- Уфимцев Г.Ф. О структуре Байкальской рифтовой зоны // *Геотектоника*. 1987. № 1. С. 93–106.
- Файзулина З. Х., Козлова Е. П. Результаты палинологического изучения третичных отложений, вскрытых глубоким бурением // *Геология и нефтегазоносность Восточной Сибири*. М.: Недра. 1966. С. 362–366.
- Флоренсов Н.А. Геоморфология и новейшая тектоника Забайкалья // *Известия АН СССР. Сер. геол.* 1948. № 2. С. 3–16.
- Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 258 с.
- Хаин В.Е., Яблонская Н.А. Тектоника Азии: 75 лет после Эмиля Аргана // *Геотектоника*. 1997. № 6. С. 3–15.
- Хассан А.И., Рассказов С.В., Чувашова И.С., Решетова С.А., Рубцова М.Н., Ясныгина Т.А., Будаев Р.Ц., Аль Хамуд А., Титова Л.А., Родионова Е.В., Усольцева М.В. Кайнозойские осадочные отложения Селенгино-Витимского прогиба и Байкальской рифтовой зоны, пространственно совмещенные в разрезе Уро // *Литосфера*. 2022. Т. 22, № 6. С. 796–817. DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-6-796-817

- Хлыстов П.А., Дехтярева Л.В. Основные этапы мезо-кайнозойского выравнивания и कोरोобразования в Западном Забайкалье // Мат-лы по геол. и полезн. ископ. Бурятской АССР. Вып. XIII. Улан-Удэ: Бурят. Кн. изд-во, 1970. С. 50–57.
- Хренов П.М., Демин А.Н., Таскин А.Н. и др. Влияние «скрытых» поперечных разломов на формирование Байкальской рифтовой зоны // Проблемы рифтогенеза. Иркутск, Воет. Сиб. филиал СО АН СССР. 1975. С. 37–39.
- Чувашова И.С., Рассказов С.В. Источники магматизма в мантии эволюционирующей Земли. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 291 с.
- Чувашова И.С., Рассказов С.В. Прорыв в изучении и датировании новейшего вулканизма Байкальской рифтовой системы и его значение для понимания новейшей геодинамики Азии // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 3. С.
- Чувашова И.С., Рассказов С.В., Йи-минь Сунь. Новейшая геодинамика Центральной Азии: первичные и вторичные мантийные расплавные аномалии в контексте орогенеза, рифтогенеза и движения–взаимодействия литосферных плит // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 1. С. 45–80. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0232.
- Шенгёр А.М.С., Натальин Б.А. Рифты мира. Учебно-справочное пособие. Пер. с англ. М.: Геокарт, 2009. 188 с.
- Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 359 с.
- Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны // Доклады АН СССР. 1977. Т. 233, № 2. С. 461–464.
- Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны и сейсмичность ее флангов // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон. М.: Наука, 1978. С. 7–18.
- Argus, D.F., Gordon, R.G., Demets, C., 2011. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 12. <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>.
- Barth A., Wenzel F. New constraints on the intraplate stress field of the Amurian plate deduced from light earthquake focal mechanisms // *Tectonophysics*. 2009. doi:10.1016/j.tecto.2009.01.029.
- Bosworth W. Geometry of propagating continental rifts // *Nature*. 1985. Vol. 316, N 6029. P. 625–627.
- Bosworth W. Off-axis volcanism in the Gregory rift, East Africa // *Geology*. 1987. Vol. 15. P. 397–400.
- Chuvashova I., Rasskazov S., Sun Yi-min, Yang Chen Origin of melting anomalies in the Japan-Baikal corridor of Asia at the latest geodynamic stage: evolution from the mantle transition layer and generation by lithospheric transtension // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. Vol. 8. No. 3. P. 435–440. Doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0256.
- Delvaux D. The karroo to recent rifting in the western brunch of the East-African rift system: a bibliographical synthesis // Royal Museum for Central Africa, Belgium, Annual report, 1989–1990. 24 p.
- England P., Molnar P. Active deformation of Asia: from kinematics to dynamics // *Science*. 1997. Vol. 278. P. 647–650.
- Florensov N.A., Logatchev N.A. The Baikal system of rift valleys // *Tectonophysics*. 1978. Vol. 45, N 1. P. 1–13.
- Gregory J.W. Contributions to the physical geography of British East Africa // *Geographical. J.* 1984. Vol. 4. P. 293–297.
- Hoggard M.J., Parnell-Turner R., White N. Hotspots and mantle plumes revisited: Towards reconciling the mantle heat transfer discrepancy // *Earth and Planetary Science Letters*. 2020. Vol. 542. P. 116317. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116317>
- Intracontinental rift comparison: Baikal and Rio Grande Rift systems // *EOS*. 1989. Vol. 70. P. 578–579, 586–588.
- Kaygorodova I.A., Sherbakov D.Yu., Martin P. Molecular phylogeny of Baikalian Lumbriculidae (Oligochaeta): evidence for recent explosive speciation // *Comparative Cytogenetics*. 2007. Vol. 1, No. 1. P. 71–84.
- Keller G.R., Bott M.H.P., Wendlandt R.F. et al. The Baikal Rift System // *Continental rifts: Evolution, structure, tectonics* / K.H. Olsen (Ed.) Publication No. 264 of the International Lithosphere Program. Elsevier: Amsterdam–Lausanne–New York–Oxford–Shannon–Tokyo, 1995. P. 3–26.

Kravchinsky V.A. Magnetostratigraphy of the Lake Baikal sediments: A unique record of 8.4 Ma of continuous sedimentation in the continental environment // *Global and Planetary Change*. 2017. Vol.152. P. 209–226. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.04.002>.

Le Pichon X., Şengör A.M.C., İmren C. Pangea and the lower mantle // *Tectonics*. 38,10.1029/2018TC005445

Levi K.G., Miroshnichenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Coleman S. & Delvaux. D. Active faults of the Baikal basin // *Bull. Centre rech. Elf explor. Prod.* 1997. Vol. 21, No. 2. P. 399–434.

Logatchev N.A., Zorin Y.A. Baikal rift zone: structure and geodynamics // *Tectonophysics*, 1992. Vol. 208. P. 273–286.

McKenzie D.P. Some remarks on the development of sedimentary basins // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1978. Vol. 40. P. 25–32.

McArthur J.M., Howarth R.J., Bailey T.R., 2001. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: best fit to the marine Sr-isotope curve for 0–509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *J. Geol.* 109, 155–170.

McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A., 2012. Chapter 7. Strontium Isotope Stratigraphy. *The Geologic Time Scale 2012*. In: Gradstein F., Ogg J., Schmitz M., Ogg G. (Eds.), Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-444-59425-9.00007-X

Molnar P., Tapponier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision // *Science*. 1975. Vol. 189, No. 4201. P. 419–426.

Petit C., Deverchere J., Houdry F., Sankov V.A., Mel'nikov V.I., Delvaux D. Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implication // *Tectonics*. 1996. Vol. 15, No. 6. P. 1171–1191.

Rasskazov S.V. Magmatism related to the East Siberia rift system and the geodynamics // *Bull. Centres Rech. Explor.–Prod. Elf. Aquitaine*. 1994. Vol. 18. No. 2. P. 437–452.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. The latest geodynamics in Asia: Synthesis of data on volcanic evolution, lithosphere motion, and mantle velocities in the Baikal-Mongolian region // *Geoscience Frontiers*. 2017. Vol. 8. P. 733–752. Doi:10.1016/j.gsf.2016.06.009.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Bornyakov S.A., Chuvashova I.S. Change of seismic hazard levels in complete 12-

year seismogeodynamic cycle of the South Baikal Basin: Results of hydroisotopic ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) monitoring // *Geology and Environment*. 2022. Vol. 2, No. 2. P. 7–21. DOI 10.26516/2541-9641.2022.2.7

Sankov V., Deverchere J., Gaudemer Y., Houdry F., Filippov A. Geometry and rate in the North Baikal rift, Siberia // *Tectonics*. 2000. Vol. 19, No. 4. P. 707–722.

Scholz C.A., Hutchinson D. R. Stratigraphic and structural evolution of the Selenga delta accommodation zone, Lake Baikal, Siberia // *Int. J. Earth Sci.* 2000. Vol. 89. P. 212–228.

Tapponier P., Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien-Shan, Mongolia and Baikal region // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84, NB7. P. 3425–3459.

Turcotte D.L., Schubert G. *Geodynamics*. Third edition. Cambridge University Press, 2014. 423 p.

Wernicke B. Uniform sense normal simple shear of the continental lithosphere // *Can. J. Earth Sci.* 1985. Vol. 22. P. 108–125.

Wilson J.T. A new class of faults and their bearing on continental drift // *Nature*. 1965. No. 4995. P. 343–347.

## References

Al Hamoud A., Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Tregub T.F., Kulagina N.V., Kolomiets V.L., Budaev R.Ts. Temporal compositional variations of Cenozoic sediments on the Tankhoi tectonic step, the Southern Baikal. *Irkutsk State University Bulletin. Earth Science Series*. Vol. 30. P. 108–129.

Al Hamoud A., Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Tregub T.F., Rubtsova M.N., Kolomiyets V.L., Budaev R.Ts., Hassan A., Volkov M.A., 2021. Overturned Eocene – Lower Pliocene alluvial stratum on the southern coast of Lake Baikal and its neotectonic significance. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (1), 139–156. doi:10.5800/GT-2021-12-1-0518

Anosov V.S. Some data on the old river network in the South-Western and Central Baikal region // *New data on geology, oil and gas content and minerals of the Irkutsk region*. Moscow: Nedra. 1964. P. 247–251.

Ashurkov S.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I. Instantaneous rates of divergence of the Eurasian and Amur plates at the Baikal interplate boundary // *Cenozoic continental rifting. Proceedings of the symposium dedicated to the 80th anniversary of the birth of Academician N.A. Logatchev*. Vol. 1.



Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2010. P. 53–56.

Baikal. Geology. Human being / Grudinin M.I., Chuvashova I.S. (Eds). Irkutsk State University Publishers, 2011. 239 p.

Balla Z., Kuzmin M.I., Levi K.G. Kinematics of the Baikal opening // *Geotectonics*. 1990. No. 2. P. 80–91.

Belov I.V. Trachybasalt formation of the Baikal region. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1963. 371 p.

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V. Sources of magmatism in the mantle of the evolving Earth. Irkutsk State University Publisher, Irkutsk, 2014. 291 p.

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V. Breakthrough in research and dating of latest volcanism in the Baikal Rift System and its significance for understanding latest geodynamics of Asia // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 3. P.

Chuvashova I.S., Rasskazov S.V., Yi-min Sun The latest geodynamics in Central Asia: primary and secondary mantle melting anomalies in the context of orogenesis, rifting, and lithospheric plate motions and interactions // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2017. Vol. 8, No. 1. P. 45–80. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0232.

Decisions of the Third Interdepartmental Regional Stratigraphic Meeting on the Mesozoic and Cenozoic of Central Siberia. Novosibirsk: Science. Sib. department, 1981. 91 p.

Devirts A.L., Rasskazov S.V., Polyakov A.I., Dobkina E.I. Radiocarbon age of young volcanoes of the Udokan Ridge (North-Eastern Baikal region) // *Geochemistry*. 1981. No. 8. P. 1250–1253.

Enikeev F.I., Potemkina V.I. Late Cenozoic of the Chara depression // *Current problems of palynology at the turn of the third millennium*. Moscow: IGI, 1999. P. 105–112.

Fayzulina Z. Kh., Kozlova E. P. Results of palynological study of tertiary deposits exposed by deep drilling // *Geology and oil and gas potential of Eastern Siberia*. Moscow: Nedra. 1966. P. 362–366.

Florensov N.A. Geomorphology and recent tectonics of Transbaikalia // *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Ser. geol.* 1948. No. 2. P. 3–16.

Florensov N.A. Mesozoic and Cenozoic depressions of the Baikal region. M.–L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1960. 258 p.

Geology and seismicity of the BAM zone. Neotectonics / Sherman S.I., Levi K.G., Ruzhich V.V., Sankov V.A., Dneprovsky Yu.I., Rasskazov S.V. Novosibirsk: Nauka, 1984. 207 p.

Grudinin M.I., Menshagin Yu.V. Ultramafic–mafic associations of the Early Precambrian. Novosibirsk: Nauka, 1987. 157 p.

Gurulev S.A. On the age of glaciation in the Northern Baikal region // *Proceedings of Vost.-Sib. geol. Institute of the WSF AS USSR*. Irkutsk, 1959. Issue. 2. P. 175–186.

Hassan A.I., Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Reshetova S.A., Rubtsova M.N., Yasnygina T.A., Budaev R.Ts., Al Hamud A., Titova L. A., Rodionova E.V., Usoltseva M.V. Cenozoic sedimentary deposits of the Selenga-Vitim trough and the Baikal rift zone, spatially combined in the Uro section // *Lithosphere*. 2022. Vol. 22, No. 6. P. 796–817. DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-6-796-817

Interior of Baikal according to seismic data / Ed. N.N. Puzyreva. Novosibirsk: Science. Sib. department, 1981. 105 p.

Khain V.E., Yablonskaya N.A. Tectonics of Asia: 75 years after Emile Argan // *Geotectonics*. 1997. No. 6. P. 3–15.

Khlystov P.A., Dekhtyareva L.V. The main stages of Meso-Cenozoic leveling and crust formation in Western Transbaikalia // *Materials on geol. and useful fossil Buryat Autonomous Soviet Socialist Republic*. Vol. XIII. Ulan-Ude: Buryat. Book publishing house, 1970. P. 50–57.

Khrenov P.M., Demin A.N., Taskin A.N. and others. The influence of “hidden” transverse faults on the formation of the Baikal rift zone // *Problems of rifting*. Irkutsk, Voet. Sib. branch of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. 1975. P. 37–39.

Kolomiets V.L. Sedimentogenesis of the Pleistocene aquatic complex and the conditions for the formation of non-metallic raw materials in the dry valleys of the Baikal rift zone. Diss. Ph.D. geol.-min. sci. Irkutsk, 2010. 278 p.

Kononov E.E., Khlystov O.M. On the age of deep-sea Baikal // *News of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, exploration and development of mineral deposits*. 2017. Vol. 40. No. 4. P. 11 8–1 29. DOI: 10.21285/2541-9455-2017-40-4-11 8-129

Kravchinsky A.Ya., Davydov V.F., Boldyrev G.S. Experience of paleomagnetic stratification of

lake bottom sediments. Baikal // Chronology of the Ice Age. Leningrad: Nedra, 1971. P. 48–56.

Kuzmin M.I., Bychinsky V.A., Kerber E.V., Oshepkova A.V., Goreglyad A.V., Ivanov E.V. Chemical composition of sediments from deep-water Baikal wells as a basis for reconstructing climate and environmental changes // Geology and geophysics. 2014. Vol. 55. No. 1. P. 3–22.

Lamakin V.V. Neotectonics of the Baikal depression. Moscow: Nauka, 1968. 247 p. (Proceedings of the Geological Institute, issue 187)

Logatchev N.A. Cenozoic continental deposits of Baikal-type depressions // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Geological series. 1958. No. 4. P. 18–29.

Logatchev N.A. Sedimentary and volcanogenic formations of the Baikal rift zone // Baikal Rift. Novosibirsk: Science. 1968. P. 72–101.

Logatchev N.A. Sayan-Baikal and Stanovoe highlands // Highlands of the Baikal region and Transbaikalia / Ed. N.A. Florensov. Moscow: Science. 1974. P. 16–162.

Logatchev N.A. Volcanogenic and sedimentary formations of the rift zones of East Africa. Moscow: Nauka, 1977. 183 p.

Logatchev N.A. History and geodynamics of the Baikal rift // Geology and Geophysics. 2003. Vol. 44, No. 5. P. 391–406.

Logatchev N.A., Brandt I.S., Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Brandt S.B., Konev A.A., Ilyasova A.M. Determination of the K–Ar age of the Paleocene weathering crust of the Baikal region // Reports of the Academy of Sciences. 2002. Vol. 385, No. 6. P. 797–799.

Logatchev N.A., Rasskazov S.V., Ivanov A.V., Levi K.G., Bukharov A.A., Kashik S.A., Sherman S.I. Cenozoic rifting in the continental lithosphere // Lithosphere of Central Asia. Ed. N.A. Logatchev. Novosibirsk: Nauka, 1996. P. 57–80.

Lopatin D.V. Transbaikalian hydraulic system of the Pleistocene // Geomorphology. 2016. No. 2. P. 113–119.

Lopatin D.V., Tomilov B.V. Ancient valleys of the Western Baikal region in connection with the problem of the formation of Baikal // River systems and reclamation. Novosibirsk, 1977. Part 2. P. 101–103.

Lopatin D.V., Tomilov B.V. Age of Baikal // Bulletin of St. Petersburg State University. Ser. 7, 2004, issue. 1. P. 58–67.

Lut B.F., Vlasova L.K., Fialkov V.A., Leshchikov F.N., Miroshnichenko A.P., Galkin V.I., Karabanov E.B., Mizandrontsev I.B., Belova V.A., Loginova L.P., Khursevich G.K., Kompanets V.Kh. Lithodynamics and sedimentation of Northern Baikal. Novosibirsk: Nauka, 1984. 290 p.

Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Bashkuev Yu.B., Dembelov M.G., Zalutsky V.T., Kale E., Deverscher J., Vernol M., Bekhtur B., Amarzhargal Sh. New data on modern tectonic deformations of the southern mountain frame of the Siberian Platform // Reports of the Academy of Sciences. 2003. Vol. 389, No. 1. P.100–103.

Mats V.D., Ufimtsev G.F., Mandelbaum M.M., Alakshin A.M., Pospeev A.V., Shimaraev M.N., Khlystov O.M. Cenozoic Baikal rift basin: structure and geological history. Novosibirsk: Publishing house SB RAS. Branch of GEO, 2001. 252 p.

Melnikova V.I., Gileva N.A., Arefiev S.S. et al. Kultuk earthquake of 2008 with  $M_w = 6.3$  in the south of Lake Baikal: spatiotemporal analysis of seismic activation // News of Solid Earth Physics. 2012. Vol. 48, No. 7–8. P. 594–614.

Misharina L.A. Stresses in the earth's crust in rift zones. Moscow: Nauka, 1967. 135 p.

Mordvinova V.V., Kobelev M.M., Khritova M.A. and others. Velocity structure of the southern margin of the Siberian craton and its folded environment based on body waves of distant earthquakes // 2017. Interexpo GEO-Siberia. 2017. Vol. 4, No. 1. P. 37–41.

Pavlovsky E.V. Geological history and geological structure of the Baikal mountain region. Moscow: Publishing house Acad. Sciences USSR, 1948. 175 p.

Pavlovsky E.V., Frolova N.V. Ancient valleys of the Lena-Angara-Baikal watershed // Bulletin of MOIP. Dept. geol. 1941. Vol. XIX (1). P. 65–79.

Palshin G.B. Cenozoic deposits of the southeastern coast of Lake Baikal. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1955. 201 p.

Pinneker E.V., Pisarsky B.I., Lomonosov I.S., Koldysheva R.Ya., Didenko A.A., Sherman S.I., 1968. Hydrogeology of the Baikal region. Moscow: Science Publishing House, 1968.170 p.

Rasskazov S.V. Pliocene-Quaternary thrust in the south of the Oka Plateau (Eastern Sayan) // Geology and Geophysics. 1990. No. 5. P. 134–138.

- Rasskazov S.V. Magmatism of the Baikal rift system. Novosibirsk: Nauka Siberian Publishing Company, 1993. 288 p.
- Rasskazov S.V. Comparison of volcanism and recent structures of hot spots of Yellowstone and Eastern Sayan // *Geology and Geophysics*. 1994. No. 10. P. 67–75.
- Rasskazov S.V. Volcanism and structure of the northeastern flank of the Baikal rift system // *Geology and Geophysics*. 1996. Vol. 37, No. 4. P. 60–70.
- Rasskazov S.V. Mid-Holocene change in tectonic stresses in the volcanic zone of the Udokan ridge, Eastern Siberia // *Volcanology and Seismology*. 1999. No. 2. P. 70–74.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Recent mantle geodynamics of Central Asia. Irkutsk: ISU Publishing House, 2013. 308 p.
- Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Volcanism and transtension in the northeastern Baikal Rift System. Novosibirsk, Academic Publishing House «GEO», 2018. 384 p.. doi: 10.21782/B978-5-6041446-3-3
- Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Orgilyanov A.I., Kovalenko S.N., Seminsky A.K., Popov E.P., Chebykin E.P. Hydrogeochemical zoning of uranium isotopes ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) in the Southern Siberian paleocontinent: the role of the South Baikal reservoir in the groundwater formation. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(3):632–650. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0496>
- Rasskazov S.V., Lyamina N.A., Chernyaeva G.P., Luzina I.V., Rudnev A.F., Rezanov I.N. Cenozoic stratigraphy of the Vitim Plateau: the phenomenon of long-term rifting in the south of Eastern Siberia. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo". 2007. 193 p.
- Rasskazov S.V., Kolomiets V.L., Budaev R.Ts., Chuvashova I.S., Al-hamud A., Hassan A., Alokla R. Recent activation of the suture zone of the Siberian craton under Southern Baikal: from shallow-Paleogene orogen to the Neogene-Quaternary rift // *Geology and Environment*. 2021. Vol. 1, No. 1. P. 7–15.
- Rasskazov S.V., Mikolaichuk A.V., Kolomiets V.L., Budaev R.Ts., Usoltseva M.V., Sun Yi-min, Xie Zhenhua, Yang Chen, Chuvashova I.S., Chikishcheva T.A., Hassan A., Hamoud A. Al, Alokla R. Cenozoic red sedimentary deposits of Inner Asia: lithogenetic significance of variations in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CO}_2$  contents // *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent)*. Meeting materials. Issue 14. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2016. P. 233–235.
- Rasskazov S.V., Yasnygina T.A., Chuvashova I.S., Mikheeva E.A., Snopkov S.V. Kultuk volcano: spatiotemporal change of magmatic sources at the western end of the South Baikal depression in the interval 18–12 million years ago // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013. Vol. 4, No. 2. P. 135–168. doi:10.5800/GT2013420095.
- Ruzhich V.V., Sherman S.I., Tarasevich S.I. New data on thrusts in the southwestern part of the Baikal rift zone // *Dokl. Academy of Sciences of the USSR*. 1972. Vol. 205, No. 4. P. 920–923.
- Sankov V.A., Chipizubov A.V., Likhnev A.V., Smekalin O.P., Miroshnichenko A.I., Kale E., Deverscher J. An approach to assessing the danger of a strong earthquake in the zone of the Main Sayan Fault based on data GPS geodesy and paleoseismology // *Geology and Geophysics*. 2004. No. 11. P. 1369–1376.
- Skoblo V.M., Lyamina N.A., Luzina I.V., Rudnev A.F. Continental Upper Mesozoic of the Baikal region and Transbaikalia. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 2001. 332 p.
- Solonenko V.P., Treskov A.A., Kurushin R.A. and others. Living tectonics, volcanoes and seismicity of the Stanovoy Highlands. Moscow: Nauka, 1966. 231 p.
- Şengör A.M.S., Natal'in B.A. Riffs of the world. Educational and reference manual. Translated from English. Moscow: Geokart, 2009. 188 p.
- Sherman S.I. Seismic process and earthquake forecast: tectonophysical concept. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2014. 359 p.
- Sherman S.I., Levy K.G. Transform faults of the Baikal rift zone // *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1977. Vol. 233, No. 2. P. 461–464.
- Sherman S.I., Levy K.G. Transform faults of the Baikal rift zone and seismicity of its flanks // *Tectonics and seismicity of continental rift zones*. Moscow: Nauka, 1978. P. 7–18.
- Ufimtsev G.F. On the structure of the Baikal rift zone // *Geotectonics*. 1987. No. 1. P. 93–106.
- Votintsev K.K., Glazunov I.V., Tolmacheva A.P. Hydrochemistry of rivers in the Lake Baikal basin. M., Nauka, 1965. 495 p.
- Zamaraev S.M., Samsonov V.V. Geological structure and oil and gas potential of the Selenga depression // *Geology and oil and gas content of*

Eastern Siberia. Moscow: Gostoptekhizdat. 1959. P. 435–475.

Zonenshain L.P., Savostin L.A., Misharina L.A., Solonenko N. Plate tectonics of the Baikal mountain region and the Stanovoy Range. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1978. Vol. 240, No. 3. P. 669–672.

Zorin Yu.A., Cordell L. Extension of the earth's crust in the Baikal rift zone according to gravimetric data // Izv. Academy of Sciences of the USSR. Ser. Physics of the Earth. 1991. No. 5. P. 3–11.

***Рассказов Сергей Васильевич,***

*доктор геолого-минералогических наук, профессор,*

*664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,*

*Иркутский государственный университет, геологический факультет,*

*заведующий кафедрой динамической геологии,*

*664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН,*

*заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,*

*тел.: (3952) 51–16–59,*

*email: rassk@crust.irk.ru.*

***Rasskazov Sergei Vasilevich,***

*doctor of geological and mineralogical sciences, professor,*

*664003 Irkutsk, st. Lenina, 3,*

*Irkutsk State University, Faculty of Geology,*

*Head of Dynamic Geology Char,*

*664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS,*

*Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,*

*tel.: (3952) 51–16–59,*

*email: rassk@crust.irk.ru.*

***Чувашова Ирина Сергеевна,***

*кандидат геолого-минералогических наук,*

*664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,*

*Иркутский государственный университет, геологический факультет,*

*доцент*

*664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128, Институт земной коры СО РАН,*

*старший научный сотрудник,*

*тел.: (3952) 51–16–59,*

*email: chuvashova@crust.irk.ru.*

***Chuvashova Irina Sergeevna,***

*candidate of geological and mineralogical sciences,*

*664003 Irkutsk, st. Lenina, 3,*

*Irkutsk State University, Faculty of Geology,*

*assistant professor,*

*664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128, Institute of the Earth's Crust SB RAS,*

*Senior Researcher,*

*tel.: (3952) 51–16–59,*

*email: chuvashova@crust.irk.ru.*