

**ДИНАМИКА
ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
ЗЕМЛИ**



**РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ
ПРОГРАММЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ № 7**

«Физические поля и внутреннее строение Земли.
Динамика межгеосферных взаимодействий»:

член-корреспондент РАН Г.А. Соболев — председатель;
академик РАН В.В. Адушкин — заместитель председателя;
кандидат физико-математических наук
С.А. Тихоцкий — ученый секретарь;
член-корреспондент РАН А.А. Маловичко;
член-корреспондент РАН П.С. Мартышко;
член-корреспондент РАН В.П. Трубицын;
доктор физико-математических наук С.В. Анисимов;
доктор физико-математических наук А.А. Спивак;
кандидат физико-математических наук А.Я. Сидорин

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Отделение наук о Земле

ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЗЕМЛИ

Светоч Плюс
Москва
2011

УДК 550.3

ББК 26.2

Д46

Д46 **Динамика физических полей Земли.** — М.: Светоч Плюс, 2011. — 312 с.: ил.
ISBN 978-5-904393-10-6

В сборнике научных трудов представлены результаты исследований, выполненных в 2009–2011 гг. по 16 проектам Программы фундаментальных исследований № 7 Отделения наук о Земле Российской академии наук «Физические поля и внутреннее строение Земли. Динамика межгеосферных взаимодействий». Программа охватывает широкий спектр проблем современной геофизики, при этом большое внимание уделено поддержке экспериментальных исследований. Содержание сборника можно условно разделить на три тематических направления: 1) глубинное строение Земли по геофизическим данным; 2) напряженное состояние и сейсмичность; 3) геофизические явления в приповерхностных слоях твердой Земли и атмосферы. Доминирующая черта исследований, особенно в первом и втором из отмеченных тематических направлений, — междисциплинарный подход при проведении наблюдений и интерпретации результатов.

Ответственные редакторы:

академик РАН М.И. Эпов

академик РАН В.В. Адушкин

член-корреспондент РАН Г.А. Соболев

Ответственный составитель:

кандидат физико-математических наук С.А. Тихоцкий

ISBN 978-5-904393-10-6

© Российская академия наук, 2011 г.

© Коллектив авторов, 2011 г.

МЕЖБЛОКОВЫЕ ЗОНЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА: ЗАКОНОМЕРНОСТИ СТРОЕНИЯ, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И ГИДРОГЕОЛОГИЯ

*К.Ж. Семинский, Н.О. Кожевников, А.В. Черемных,
Е.В. Поспеева, А.А. Бобров, В.В. Оленченко,
М.А. Тугарина, В.В. Потапов, А.А. Решилова*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск*

Введение

После работ Л.И. Красного [1984] и М.А. Садовского с соавторами [1987] большинство специалистов придерживаются концепции, согласно которой литосфера представляет собой иерархическую структурированную среду, состоящую из блоков, взаимодействующих по зонам с пониженной (вследствие раздробленности) квазивязкостью субстрата. Зонно-блоковая структура различных объемов литосферы сложна для картирования в связи с многообразием проявлений межблоковых зон. В тектоническом отношении это могут быть разломы, полосы распространения разноранговых разломов и трещин, зоны повышенной трещиноватости. Кроме того, межблоковая зона иногда внешне по-разному проявляется на отдельных участках вдоль ее простира-ния, а также в зависимости от стадии эволюционного развития. Очевидно, эти отличия будут усиливаться у зон, относящихся к разным масштабным рангам и генетическим типам, а также формирующихся в условиях неравномерного внешнего воздействия, под влиянием структурно-вещественных неоднородностей коры и на ее разных глубинных уровнях.

В настоящее время прогресс в картировании зон взаимодействия блоков связывается с возможностью исследования одного объекта комплексом разнотипных геолого-геофизических методов [*Unsworth et al.*, 1997; *Schulz, Evans*, 2000; *Weber et al.*, 2009 и др.]. В статье представлены результаты подобных работ, проведенных на территории центрального Прибайкалья (рис. 1, а), где в процессе взаимодействия Сибирского и Забайкальского блоков литосферы происходит активное формирование Байкальской межблоковой зоны с одноименным рифтом, располагающимся в ее осевой части

[Семинский и др., 2008б]. Характер нарушенности земной коры территории, окружающей оз. Байкал, в наиболее общем виде отражает схема, представленная на рис. 1, б. Она составлена в соответствии с отработанными ранее методическими приемами [Семинский, 2001] на основе анализа распределения спрямленных элементов рельефа (линеаментов), которые выделяются на его трехмерной модели (рис. 1, а). Эти элементы группируются в протяженные зоны, между которыми располагаются блоки, характеризующиеся меньшей концентрацией разноориентированных и непротяженных линеаментов. Хотя линеаменты лишь до некоторой степени представляют активные в новейшее время разломы, в целом рассматриваемая схема отражает зонно-блоковое строение земной коры региона. Более того, по иерархии структурных элементов эта схема согласуется с аналогичными крупно- и мелкомасштабными картами, составленными ранее, с одной стороны, для территории Западного Прибайкалья, а с другой — для Байкальской рифтовой зоны и Центральной Азии в целом. [Семинский, 2008].

Вместе с тем границы Байкальского рифта, показанные на рис. 1 по данным предшественников [Карта. . . , 1979], лишь в первом приближении совпадают с внешними ограничениями составляющих его зон 2-го порядка. Это обусловлено определенной неоднозначностью выделения отдельных элементов зонно-блоковой делимости, схема которой в данном случае была составлена на основе только одного признака — пространственного распределения линеаментов рельефа. Данный пример иллюстрирует актуальность предпринятого комплексного исследования, главные задачи которого заключались в следующем: 1) изучить специфику проявления межблоковых зон в геолого-геофизических полях различной природы вдоль профилей п. Баяндай – м. Крестовский и с. Кудара – с. Тарбагатай; 2) выявить границы и иерархию межблоковых зон земной коры центрального Прибайкалья; 3) оценить возможности различных методов изучения межблоковых зон и на этой основе предложить эффективный комплекс методов для исследования зонно-блоковой структуры земной коры.

Тектонические особенности района исследований

Оба участка, выбранные в центральном Прибайкалье для проведения комплексных исследований, образуют единый профиль (с разрывом на акватории оз. Байкал), который позволяет изучить строение западного и восточного бортов Байкальского рифта, активно развивающегося в кайнозой у южной границы Сибирского кратона (рис. 1). Значительная протяженность профиля, высокая детальность съемок и оптимальное сочетание дополняющих друг друга методов исследования отличают эти работы от тех, которые были вы-

полнены в центральном Прибайкалье ранее [Пиннекер и др., 1968; Поспеев, Михалевский, 1975; Шерман, 1977; Соотношение... , 1979; Крылов и др., 1981; Попов, 1989; Леви и др., 1997; Delvaux et al., 1997; Ружич, 1997; Бердичевский и др., 1999; Мац и др., 2001; Логачев, 2003; Резанов и др., 2004; Скляр и др., 2007; Structural... , 2005; Яковлев и др., 2007; Лунина и др., 2009 и др.]. Результаты предшествующих работ кратко обобщены ниже и учтены при интерпретации оригинальных материалов, полученных авторами настоящей статьи.

Главные закономерности строения рассматриваемых участков отражены на соответствующих им геологических разрезах (рис. 2, 3, б) и фрагменте трехмерной модели рельефа (рис. 1, а). На северо-западном фланге профиля п. Баяндай – м. Крестовский распространены разнотипные комплексы Сибирского кратона, которые относительно спокойно залегают на периферии территории и интенсивно дислоцированы в районе р. Бугульдейка (Прибайкальский краевой прогиб). В юго-восточной приольхонской части профиля обнажаются полихронные метаморфические комплексы краевых поднятий Саяно-Байкальского складчатого пояса. Контакт двух крупных тектонических единиц центрально-азиатского региона происходит по системе разломов краевого платформенного шва (Приморский сегмент), который представлен широкой полосой бластомилонитов и интрузивных проявлений, включая гранитоиды приморского комплекса. Профиль с. Кудара – с. Тарбагатай проходит в пределах Саяно-Байкальского пояса и охватывает область распространения интрузивных образований протерозоя и палеозоя, а также (в северо-западной части) — метаморфических пород докембрия. В мезо-кайнозойское время на этом геологическом субстрате образовались впадины за счет вертикальных перемещений по разломам, главными из которых являются Дельтовый, Бортовой и др.

Активизация тектонических нарушений в кайнозойское время привела к формированию сложного рельефа. Его характерная особенность — чередование относительно приподнятых и опущенных форм, морфология которых подчеркивает доминирование перемещений по сбросам северо-восточного простирания, активным на современной (рифтовой) стадии развития региона. Западный профиль пересекает Предбайкальский прогиб, Прибайкальский краевой выступ (флексуру), Онотское плоское поднятие, Прихребтовую депрессию, Приморское глыбовое поднятие, Бугульдейско-Чернорудскую впадину и Приольхонскую краевую ступень (рис. 2, б), а восточный — Усть-Селенгинскую впадину, Фофановскую кристаллическую перемычку, Селенгино-Итанцинскую впадину, поднятие хребта Хамар-Дабан, Иволгино-Удинскую впадину и поднятие Ганзуринского хребта (рис. 3, б).

Рельеф Прибайкалья представляет один из главных факторов пространственного распределения и гидрогеохимических особенностей источников подземных вод изучаемой территории. По существующим классификациям они относятся к пресным водам средне- и предгорных районов, главным образом поверхностного происхождения, в анионном составе которых преобладают гидрокарбонат- и сульфат-ионы, а среди катионов — кальций, магний и, реже, калий и натрий. Области питания этих вод — приподнятые участки рельефа, а разгрузки — располагающиеся между ними линейно вытянутые депрессии. Ввиду того, что последние приурочены к активным разломам, воды в пределах этих депрессий могут изменяться за счет вклада глубинной составляющей, переходя в класс минерализованных, а зачастую и термальных. В настоящее время такая ситуация имеет место на восточном участке (источники Энхалук, Халютинский Аршан и др.), а в позднем неоплейстоцене была характерна для территории Приольхонья, принадлежащего к западному участку исследований. Отмеченное положение терм коррелирует с распределением эпицентров землетрясений, поскольку и то, и другое определяется степенью современной тектонической активности. Наиболее интенсивные проявления сейсмичности тяготеют к ближайшим по отношению к оси рифта зонам прибрежных сбросов (Морскому и Дельтовому), тогда как к северо-западу и юго-востоку от них плотность эпицентров землетрясений снижается.

Глубинное строение региона, судя по результатам мелкомасштабных данных магнитотеллурических зондирований, отличается наличием системы проводящих субгоризонтальных слоев и субвертикальных зон флюидной природы. Кровля внутрикорового слоя с низким удельным электрическим сопротивлением в пределах рассматриваемого региона располагается на глубине примерно 12 км. Наиболее значимые из субвертикальных зон имеют ширину 10–20 км и отождествляются с двумя сбросовыми разломными системами западного и восточного бортов Байкальского рифта, уходящими глубоко в верхнюю мантию.

Методы и результаты исследований

Для решения поставленных задач в пределах профилей были проведены следующие исследования: изучение разрывов структурно-геологическими методами, морфотектонический анализ рельефа на основе полевых геоморфологических наблюдений и дешифрирования дистанционных материалов, магнитная съемка, электроразведка методами естественного электрического поля (ЕП) и электропрофилирования (ЭП), магнитотеллурические зондирования (МТЗ), гидрогеохимическое опробование водопроявлений и эманаци-

онная съемка. Выбранные методы позволяют оценить характер нарушенности земной коры разрывами, определяющими внутреннее строение зон активного взаимодействия блоков. Эффективность методического комплекса обеспечивается сочетанием прямых приемов картирования разломов с косвенными, основанными на повышенной проницаемости разломных зон для магмы и флюидов. Важную информацию о строении в целом хорошо изученной территории центрального Прибайкалья удалось получить за счет постановки новых для этого региона видов исследований (радон-тороновая съемка), проведения работ с более высокой детальностью (электро- и магниторазведка), а также применения современной аппаратуры (МТЗ). К важным преимуществам использованного методического комплекса следует отнести высокую производительность работ, позволившую быстро сформировать банк данных, характеризующих распределение разнотипных полей вдоль профилей п. Баяндай – м. Крестовский и с. Кудара – с. Тарбагатай.

Наиболее детально были изучены ближние к оси рифта участки профилей, где расстояние между точками измерений в рамках отдельных видов съемок было 50 м (рис. 4). Поскольку расстояние между пунктами МТЗ составляло от 2500 до 5000 м, для равноценного анализа разнотипных полей вдоль профилей первичные данные (рис. 4) осреднялись в окне 2500 м (рис. 2, 3, в). В некоторых случаях графики, необходимые для сравнительного анализа, строились для трасс изучаемых профилей по полосовидным картам распределения рассматриваемого параметра в изолиниях.

Попытка выполнить прямую корреляцию представленных на рис. 4 параметров не привела к выявлению устойчивых зависимостей между ними. Поэтому основным способом анализа было сопоставление характера изменчивости разнотипных полей вдоль профилей, для чего по опыту предыдущих геолого-геофизических работ [Семинский и др., 2008а] использовалось отклонение значения поля от среднего по выборке.

Геолого-структурные исследования проводились в соответствии с принципами спецкартирования, изложенными в публикации [Семинский, 2005]. В итоге по трассам профилей были выделены активные в новейшее время разломы; в отдельных точках проведена реконструкция поля тектонических напряжений (рис. 2, 3, б). Анализ этих материалов позволил выявить в пределах профилей несколько интервалов, где верхняя часть земной коры нарушена разломами, имеющими субвертикальное падение или наклон в сторону оз. Байкал. Почти все выделенные участки характеризуются наличием крупных сбросов (западный профиль: Морской — 0 км, Приморский — 15 км, Прихребтовый — 31 км; восточный профиль: Дельтовый — 15 км, Бортовой — 55 км и др.) в совокупности с опережающими их структурами. Исключение со-

ставляют участки на северо-западном фланге профиля п. Баяндай – м. Крестовский, где преобладают небольшие разломы взбросового типа.

Таким образом, согласно геолого-структурным данным, весь восточный профиль и юго-восточный фланг западного «попадают» в пределы Байкальского рифта. Его западная граница пересечена профилем п. Баяндай – м. Крестовский в районе отметки 40 км, что подтверждает взгляды тех исследователей, которые проводят ее по северо-восточным сегментам долин рек Анга, Бугульдейка и Куртун. Этот вывод в совокупности с уточнением геометрии и типов подвижек по крупным разломам изученного региона (рис. 2, 3, б) является результатом геолого-структурного анализа, важным для последующей интерпретации геофизических данных.

Морфотектонический анализ рельефа проводился путем сопоставления гипсометрических профилей (рис. 2, 3, б) и графиков вариаций параметра плотности линеаментов (D — количество спрямленных элементов рельефа в пределах квадратной ячейки площадью 9 км^2 (см. рис. 2, 3, в), выделенных на изучаемых участках с использованием известных методических приемов [Ранцман, 1979]. В результате выяснилось, что впадинам и пониженным формам рельефа соответствуют зоны наибольшей нарушенности горного массива, а участкам с максимальными отметками — места с меньшей плотностью линеаментов. Таким образом, на гипсометрически пониженных и наиболее нарушенных участках горного массива профили пересекают подвижные зоны, по которым контактируют массивные блоки земной коры. Разномасштабные межблоковые зоны имеют преимущественно северо-восточную ориентировку. Наиболее крупные из них отличаются неоднородным внутренним строением и располагаются в пределах ближних к оси Байкальского рифта половинах изученных профилей (рис. 2, 3).

Радон-тороновая съемка проведена (рис. 2, 3, в) по отработанной для условий Прибайкалья методике [Семинский, Бобров, 2009], позволяющей измерять для каждой пробы почвенного воздуха объемную активность радона-222 (Q , Бк/м³) и количество распадов торона в рабочей камере радиометра (N). Распределение газовых эманаций на профилях в целом согласуется с характером нарушенности горных пород разрывами, установленным при анализе геолого-структурных и морфотектонических материалов (рис. 2, 3, б–в). Обращает на себя внимание специфика эманационных полей в пределах ближних к оси рифта участков профилей. Так, отмеченная взаимосвязь эманаций с нарушенностью горного массива не характерна для северо-западной половины профиля с. Кудара – с. Тарбагатай, что можно объяснить наличием мощной толщи четвертичных отложений, заполняющих Усть-Селенгинскую депрессию и изменяющих условия миграции газов

к поверхности. К характерным особенностям юго-восточной части западного профиля нужно отнести соответствие двух широких аномалий плотности линейментов четырем пикам значений Q и N , которые сближены или образуют единую аномалию.

Гидрогеологические исследования базировались на результатах опробования подземных вод в нескольких десятках точек, которые располагались в непосредственной близости от изученных профилей. Дополнение этих данных материалами Государственной гидрогеологической съемки (М 1:200 000) позволило получить для западного участка представительную сеть из 46 точек. Кроме подтверждения отмеченных в предыдущем разделе общих представлений о составе и типах подземных вод Прибайкалья, установлено, что определяющую роль в гидрогеологии региона играет тектонический фактор. Основные аномалии минерализации, анионного состава и распределения естественных выходов подземных вод приурочены к наиболее нарушенным, часто гипсометрически пониженным участкам профиля п. Баяндай – м. Крестовский. Данная особенность определяется наличием сильно выветрелых пород, а также сочетанием проницаемых и непроницаемых (в случае заполнения глиной трения) для воды разломных сместителей. Это создает затрудненные условия для водообмена, индикатором которых является повышенное содержание суммы сульфат- и хлор-ионов при соответствующем понижении уровня гидрокарбонат-иона (рис. 2, 3, б–в). В отличие от опущенных участков, гипсометрически поднятые блоки образуют области питания подземных вод, которые, являясь пресными или ультрапресными (из-за непродолжительного взаимодействия с породой), богаты атмосферным гидрокарбонат-ионом.

Съемка ЕП способом потенциала с использованием неполяризующихся электродов [Семенов, 1980] выявила три интервала на профиле п. Баяндай – м. Крестовский с отрицательными аномалиями большой амплитуды (рис. 2, в). По форме и амплитуде они аналогичны измеренным ранее в Приольхонье [Кожевников, 1998; Kozhevnikov, Tezkan, 1998; Кожевников и др., 2004] и, скорее всего, приурочены к древним крутопадающим разломным зонам с графитовой минерализацией, образующей непрерывные, электрически связанные системы с электронным механизмом проводимости. С другой стороны, график потенциала ЕП вблизи отметки 14 км профиля, где установлена самая широкая аномалия, характеризуется отрицательной корреляцией с рельефом. Аналогичная по типу связь имеет место для всего профиля с. Кудара – с. Тарбагатай: продольные вариации потенциала ЕП и высоты рельефа в его пределах происходят в противофазе. Поэтому логично предположить, что вклад в аномалию ЕП вносит не только геобатарей, но и

электрическое поле, возникающее при фильтрации подземных вод в направлении от высоких отметок рельефа к низким [Комаров, 1994]. Характерно, что, независимо от природы естественного электрического поля, его характер в центральном Прибайкалье определяется наличием древних разломных зон, активизировавшихся в позднекайнозойское время, которые, с одной стороны, представлены проводящим электрический ток субстратом, а с другой — выражены депрессиями в рельефе.

Электропрофилированием изучены центральная часть восточного и юго-восточная часть западного профилей. При исследовании западного профиля использовалась симметричная установка А40М20N40В, обеспечивающая эффективную глубину исследования порядка первых десятков метров. Как видно из полученных графиков (рис. 4), значительную часть профиля занимают участки, где кажущееся сопротивление падает до первых десятков Ом·м. Это трудно объяснить исключительно различием электрических свойств минеральной матрицы обнажающихся горных пород. По-видимому, низкие значения ρ_k в значительной мере контролируются интенсивной обводненностью и выветриванием горного массива вследствие его нарушенности разрывами. На западном профиле аномалиями кажущегося сопротивления отмечается его северо-западный фланг, включающий Бугульдейско-Чернорудский грабен и смежный юго-восточный борт Приморского хребта. Измерения вдоль восточного профиля выполнены осевой установкой А100В10М10N, глубинность исследования которой также оценивается величиной порядка первых десятков метров. Почти весь восточный профиль характеризуется пониженными удельными сопротивлениями; исключением является хребет Хамар-Дабан, причем самыми низкими значениями ρ_k отмечаются участки его перехода к Селенгино-Итанцинской и Иволгино-Удинской депрессиям.

Магнитная съемка с измерением модуля полного вектора магнитной индукции (T) выполнена протонным магнитометром ММП-203 в пределах всего восточного и на юго-западном фланге западного профилей (рис. 4). Геомагнитное поле отражает преимущественно минеральный состав горных пород и слабо зависит от степени нарушенности массива, поэтому при картировании межблоковых зон данные магниторазведки отличаются наибольшей неоднозначностью интерпретации. Тем не менее, во многих случаях зоны максимумов и минимумов поля T совпадают с участками, соответственно, повышенных и пониженных значений ρ_k . Хотя причина отмеченной корреляции ρ_k и T в настоящий момент остается невыясненной, тот факт, что межблоковые зоны, несмотря на «маскирующее» влияние вещественного фактора, находят отражение в геомагнитном поле, не вызывает сомнений.

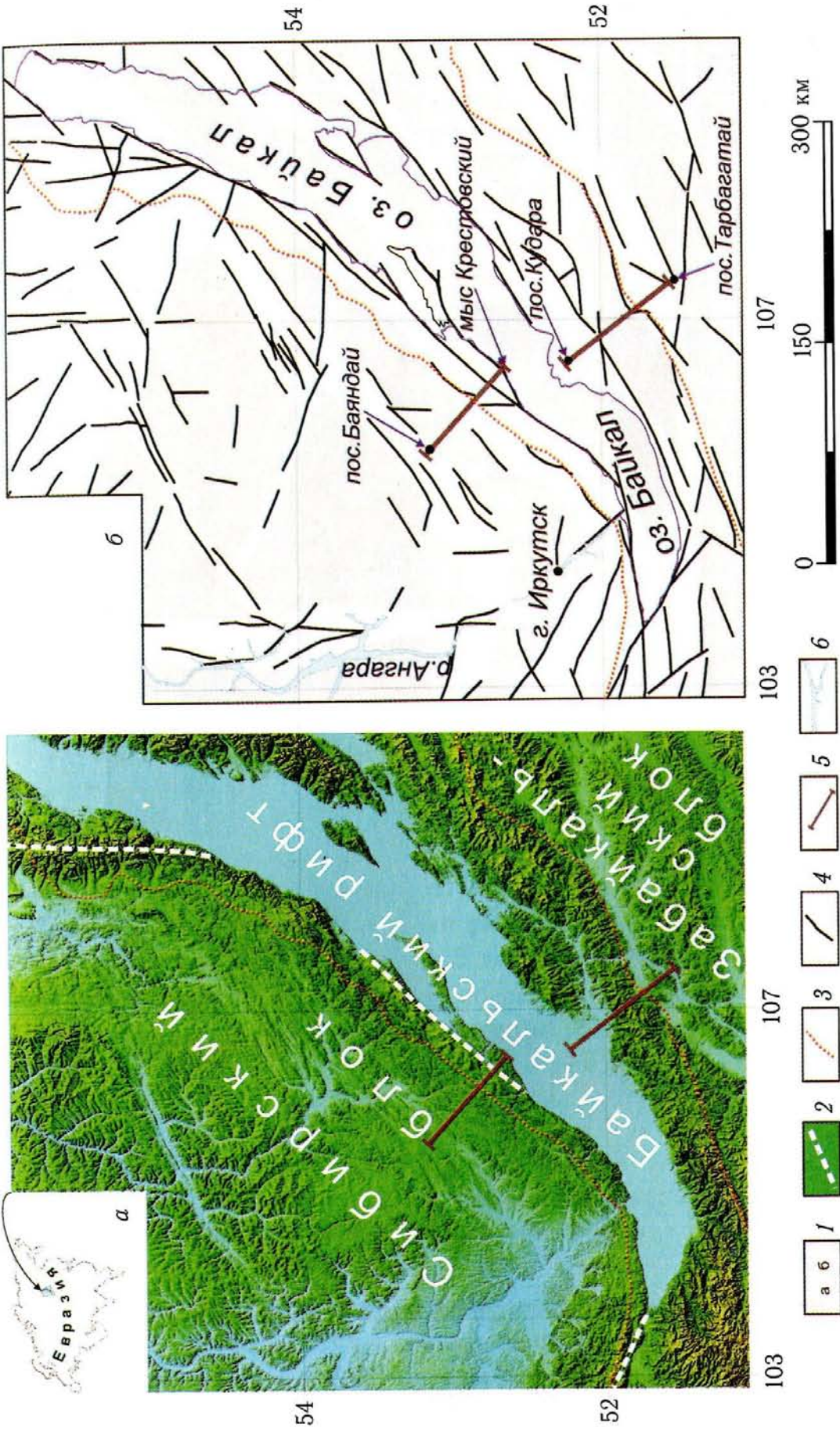


Рис. 1. Трехмерная модель рельефа (а) и построенная на ее основе схема зонно-блоковой структуры земной коры Прибайкалья (б)

1 — участки, занимаемые подвижными зонами (а) и блоками (б); 2 — краевой шов Сибирской платформы; 3 — границы Байкальского рифта, по [Карга..., 1979]; 4 — разломы, выраженные в рельефе уступами и спрямленными элементами речных долин; 5 — профили п. Байндай — м. Крестовский и с. Кудара — с. Тарбагатай; 6 — гидросеть

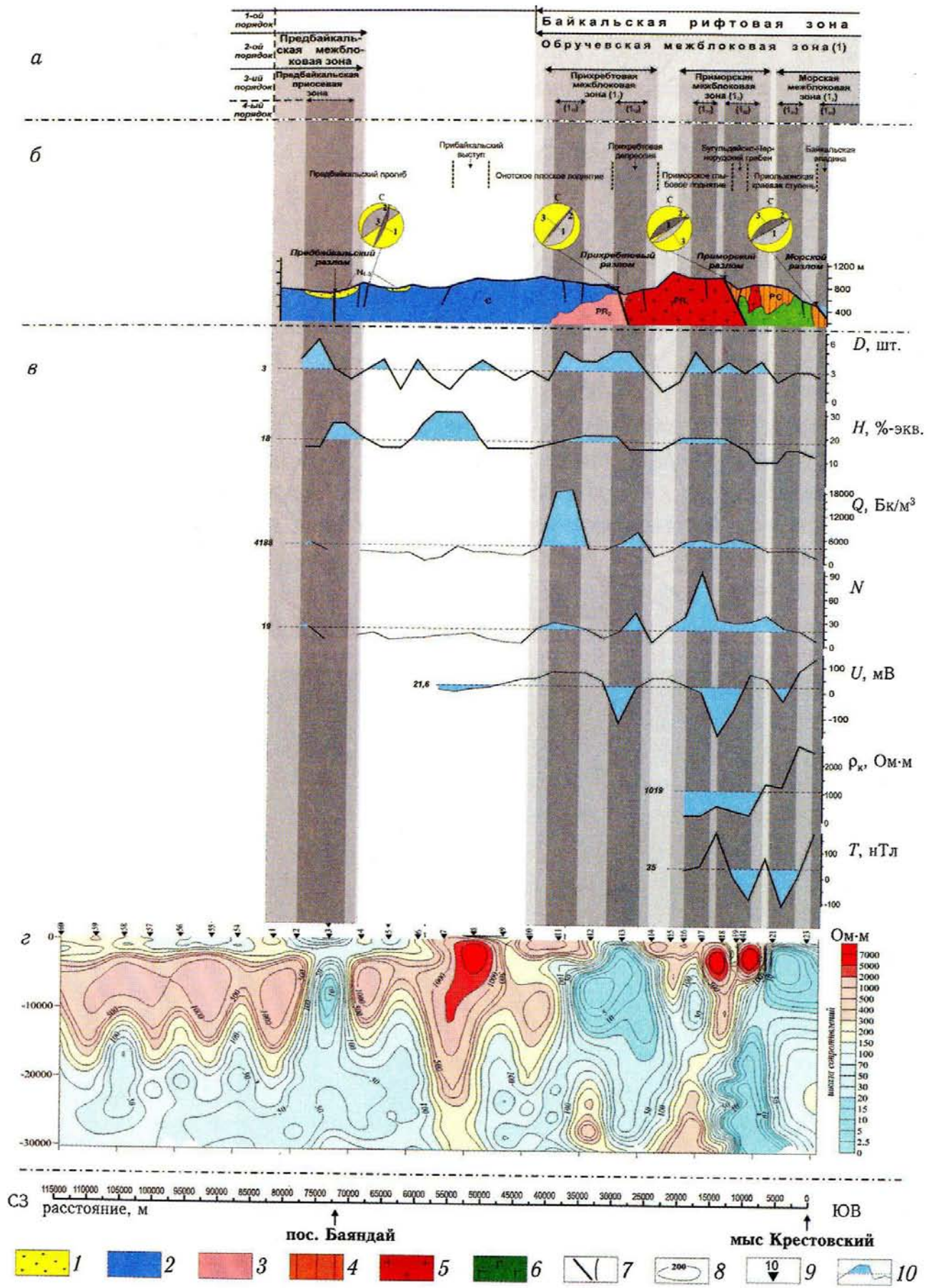


Рис. 2

←

Рис. 2. Результаты комплексных исследований по профилю п. Баяндай – м. Крестовский, отражающие зонно-блоковую структуру земной коры западного плеча Байкальского рифта в центральном Прибайкалье

а — иерархия зон и блоков на четырех уровнях, согласно результатам комплексных исследований;

б — основные морфотектонические подразделения и принципиальный структурно-геологический разрез верхней коры. На диаграммах, построенных в проекции верхней полусферы, показаны плоскости сместителя разлома (темная) и сопряженная с ней система разрывов 2-го порядка (светлая), а также положение осей главных нормальных напряжений: 1 — сжатия, 2 — промежуточная, 3 — растяжения;

в — изменения вдоль профиля плотности линеаментов (D), процентного содержания суммы сульфат- и хлор-ионов в пробах подземных вод (H), объемной активности радона (Q), количества распадов торона (N), потенциала ЕП (U), кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k) и модуля полного вектора магнитной индукции (T);

г — геоэлектрический разрез верхней коры, составленный по данным МТЗ;

1 — аллювиально-озерные отложения (пески, глины, галечники и др.); 2 — породы верхней части осадочного чехла платформы (песчаники, доломиты, известняки, алевролиты, углисто-глинистые сланцы, каменная соль и др.); 3 — породы краевого прогиба платформы (кварциты, метаморфизованные кварцевые порфиры, известняки и др.); 4 — метаморфизованные породы складчатого пояса (разнотипные гнейсы и сланцы, амфиболиты, кристаллические известняки, кварциты и др.); 5–6 — интрузии гранитов (5) или габбро, габбро-диориты, диоритовые порфиры и др. (6); 7 — крупные и более мелкие разломы; 8 — изолинии значений удельного электрического сопротивления, Ом·м; 9 — пункты МТЗ; 10 — аномальные значения параметров, отличающиеся в большую (для D , H , Q и N) или меньшую (для U , ρ_k и T) сторону от среднего арифметического (красный пунктир)

Магнитотеллурические зондирования в диапазоне периодов 0.003–10000 с выполнены с применением современной технологии V5 System-2000 и использованием аппаратуры «MTU-5» компании «Phoenix Geophysics» (Канада). Исследования отличались от работ предшественников высокой детальностью с шагом зондирований от 5 до 2.5 км. Для обработки полевых данных использовалось программное обеспечение «Phoenix Geophysics». 1D- и 2D-инверсия данных МТЗ выполнена с помощью программного комплекса «LineInterMT». По характеру геоэлектрического разреза в пределах изученных профилей выделяются 5 участков (рис. 2, 3, г).

На профиле п. Баяндай – м. Крестовский выделены северо-западный участок, отвечающий Сибирскому кратону, и юго-восточный участок, к которому относятся приграничные платформенные структуры, а также приольхонский блок, представленный древними полихронными метаморфитами (Ольхонская коллизионная зона — по [Fedorovsky, Sklyarov, 2010]). Они резко различаются особенностями состава и строения земной коры и по интенсивности проявления рифтогенных процессов, что нашло отражение в характере распределения и величинах удельного электрического сопротивле-

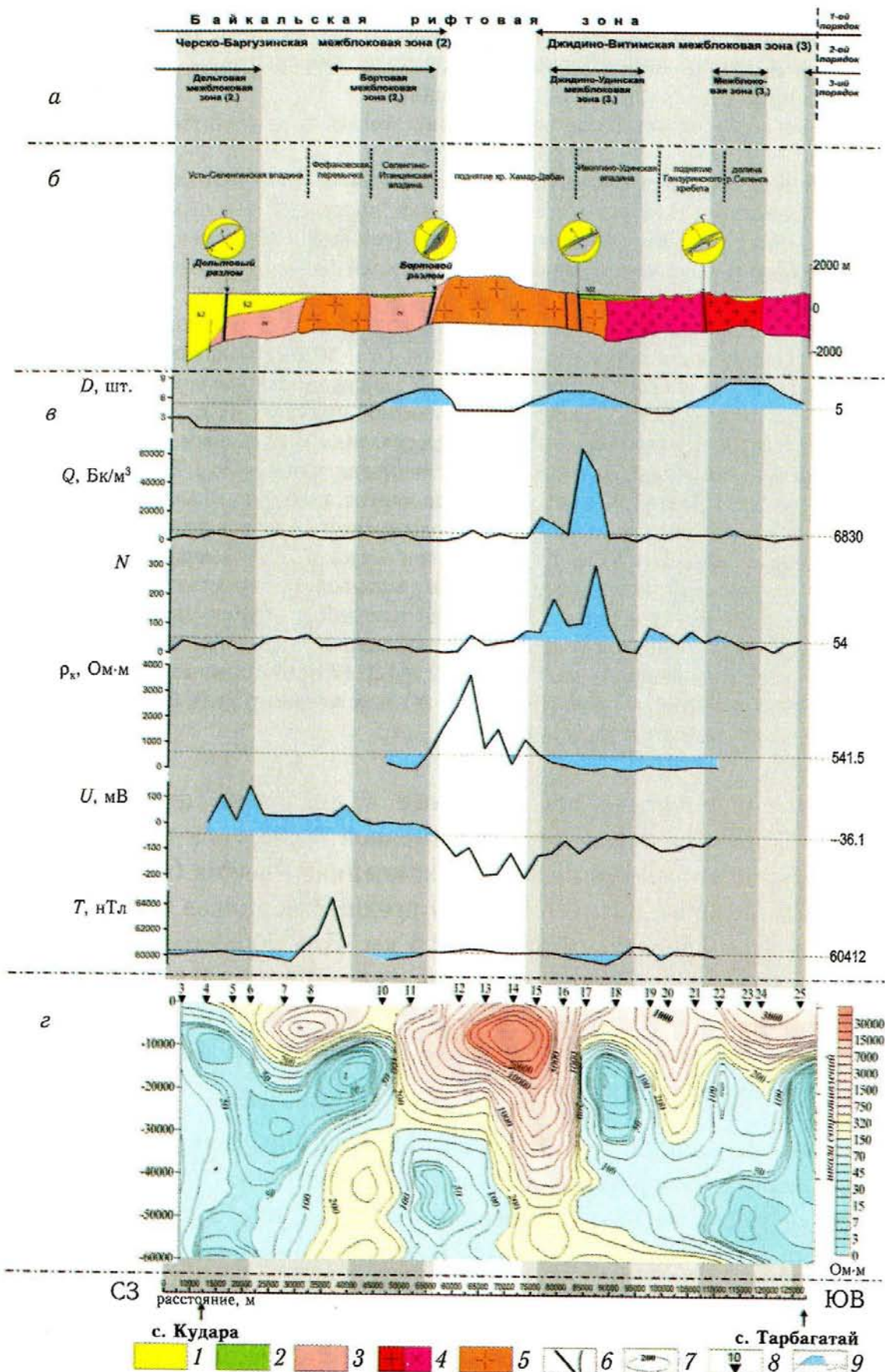


Рис. 3

←

Рис. 3. Результаты комплексных исследований по профилю с. Кудара – с. Тарбагатай, отражающие зонно-блоковую структуру земной коры восточного плеча Байкальского рифта в центральном Прибайкалье

а — иерархия зон и блоков на трех уровнях, согласно результатам комплексных исследований;

б — основные морфотектонические подразделения и принципиальный структурно-геологический разрез верхней коры. На диаграммах, построенных в проекции верхней полусферы, показаны плоскости сместителя разлома (темная) и сопряженная с ней система разрывов 2-го порядка (светлая), а также положение осей главных нормальных напряжений: 1 — сжатия, 2 — промежуточная, 3 — растяжения;

в — изменения вдоль профиля плотности линеаментов (D), объемной активности радона (Q), количества распадов торона (N), кажущегося удельного электрического сопротивления (ρ_k), потенциала ЕП (U) и модуля полного вектора магнитной индукции (T);

г — геоэлектрический разрез верхней коры, составленный по данным МТЗ;

1 — кайнозойские озерные и аллювиальные отложения (пески, глины, галечники и др.); 2 — мезозойские отложения (конгломераты с прослоями песчаников и глинистых сланцев, песчаники и др.); 3 — докембрийские сланцы, гнейсы, кристаллические известняки и доломиты; 4–5 — интрузии гранитов и сиенитов палеозоя (4) и протерозойские граниты, граносиениты, гранодиориты, сиениты, диориты и диоритовые порфиры (5); 6 — крупные и более мелкие разломы; 7 — изолинии значений удельного электрического сопротивления, Ом·м; 8 — пункты МТЗ; 9 — аномальные значения параметров, отличающиеся в большую (для D , Q , N и U) или меньшую (для ρ_k и T) сторону от среднего арифметического (красный пунктир)

ния (УЭС). Кратонному блоку соответствуют преимущественно высокие значения УЭС, обусловленные составом земной коры (рис. 2, *г*). На глубинах 16–20 км здесь отчетливо фиксируется кровля проводящего внутрикорового слоя. Юго-восточный блок, особенно в части коллизионной зоны, с исключительно сложным вещественным составом и интенсивной нарушенностью глубинными рифтогенными разломами. Высокие сопротивления отвечают здесь магматическим и метаморфическим образованиям преимущественно в верхней части разреза земной коры; большая же ее часть характеризуется обширными глубокими минимумами УЭС.

На Забайкальском профиле выделены три участка, различающиеся по геолого-геофизической характеристике, особенностям теплового режима и типам геоэлектрического разреза (рис. 3, *г*). Селенгинский участок характеризуется очень низкими значениями УЭС на всю мощность земной коры, исключая самую верхнюю часть, где докембрийские породы имеют сопротивление 300–400 Ом·м. Кровля проводящего слоя поднимается здесь до глубин 7–10 км. Хамардабанский блок представляет сложно построенную геоэлектрическую неоднородность высокого сопротивления (более 15 000 Ом·м). Для юго-восточного участка характерно развитие высокощелочных магматических пород, с интенсивными региональными аномалиями магнитного поля,

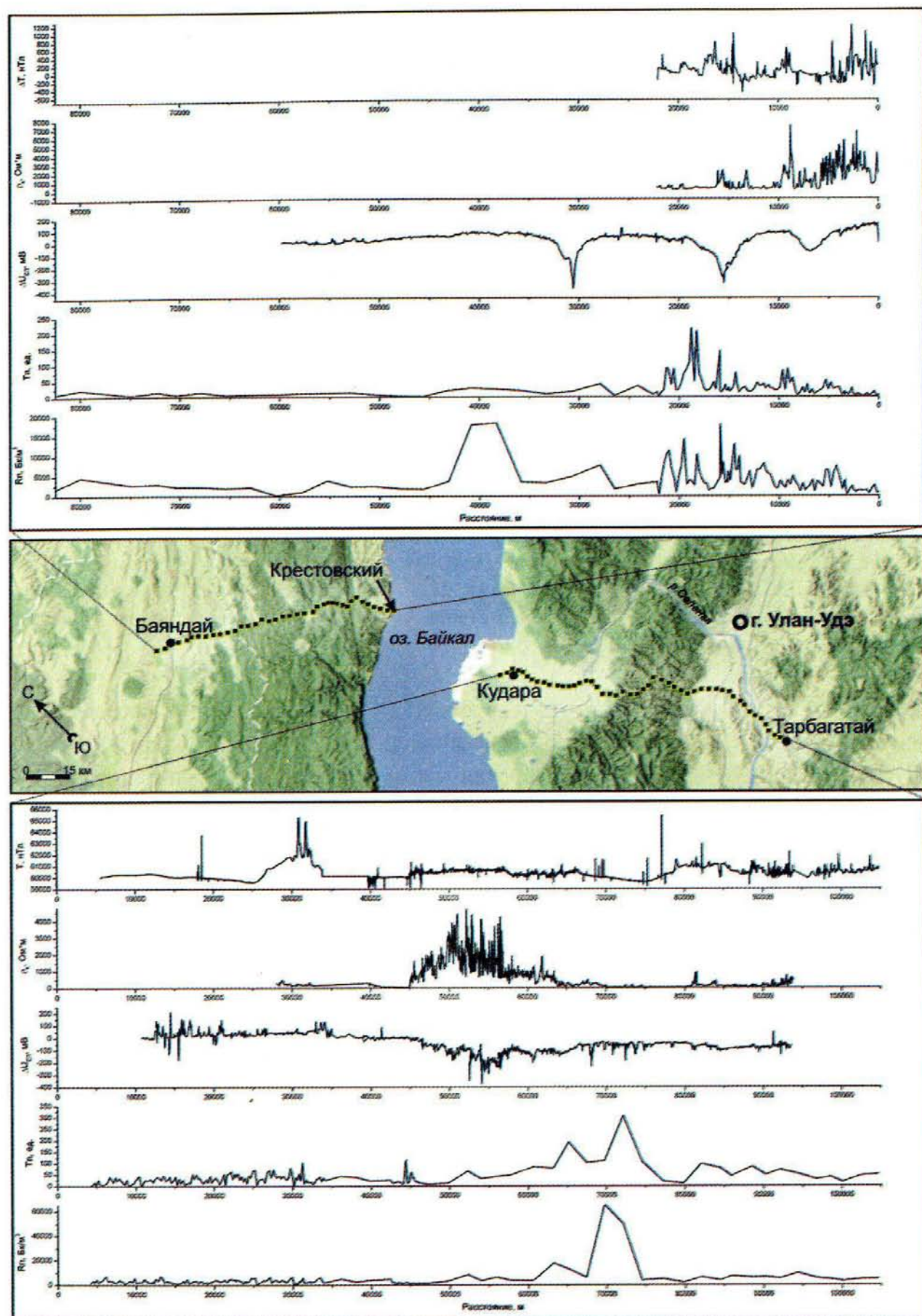


Рис. 4

←

Рис. 4. Положение западного (п. Баяндай – м. Крестовский) и восточного (с. Кудара – с. Тарбагатай) исследовательских профилей, а также соответствующие им первичные графики разнотипных геофизических полей: приращения модуля полного вектора магнитной индукции (ΔT), кажущегося удельного электрического сопротивления по данным СП (ρ_k), потенциала ЕП (ΔU_{EP}), количества распадов торона (Tn) и объемной активности радона (Rn)

обусловленными высоким содержанием в породах окислов железа. Широкое развитие этого типа магматизма и его глубинный характер определяют абсолютное преобладание низкого УЭС в пределах большей части геоэлектрического разреза. Кровля внутрикорового проводящего слоя здесь, вероятно, находится на глубине 16–20 км.

Иерархия межблоковых зон центральной части Байкальского рифта

В предыдущем разделе дано описание разнотипных полей, анализ которых позволил выделить в центральном Прибайкалье аномальные участки. Отдельные аномалии, несмотря на различие рассматриваемых геолого-геофизических полей, приурочены к одним и тем же участкам профиля (рис. 2, 3) и, судя по характеру количественных показателей и структурной выраженности, представляют межблоковые зоны изучаемого региона. Их субстрат вследствие нарушения разрывами высокопроницаем для флюидов, миграция которых представляет одну из основных причин, приводящих к возникновению геофизических аномалий. Как правило, зонам соответствуют: понижение в рельефе, максимум плотности линеаментов, пики объемной активности радона и количества распадов торона, максимум общей минерализации подземных вод и аномальные условия водообмена, минимум УЭС, а также — в отдельных случаях — минимумы потенциала естественного электрического поля и модуля полного вектора магнитной индукции. Полученные для центрального Прибайкалья материалы позволили изучить иерархию межблоковых зон на 3–4 уровнях, первому из которых можно поставить в соответствие Байкальский рифт в целом. На рис. 2, 3 каждый последующий ранг выделен более густым оттенком серого цвета, причем положение зон усреднено по нескольким признакам. Ниже иерархическая соподчиненность межблоковых зон иллюстрируется на примере западного участка, где представлены все четыре уровня.

Как видно на рис. 2, а, шесть из семи аномалий располагаются в юго-восточной части профиля п. Баяндай – м. Крестовский. Исключение со-

ставляет участок, приуроченный к осевой части Предбайкальского прогиба. Степень проявления шести зон в изученных полях характеризуется закономерными качественными и количественными различиями. Для второй (I_{31}), четвертой (I_{21}) и шестой (I_{11}) из них, считая с юго-востока (рис. 2, а), по сравнению с тремя другими зонами, в большинстве случаев свойственны более выраженные положительные аномалии D , H , Q и N . С другой стороны, в рельефе эти зоны проявлены менее отчетливыми впадинами и представлены небольшими разломами разных морфогенетических типов. В отличие от них, первая (I_{32}), третья (I_{22}) и пятая (I_{12}) зоны образованы крупными наклоненными на юго-восток сбросами (Прихребтовый, Приморский и Морской), перемещения по которым привели к формированию глубоких грабенов (рис. 2, а–б). Это говорит о том, что зоны I_{32} , I_{22} и I_{12} представлены глубинными, а три другие (I_{31} , I_{21} и I_{11}) — близповерхностными дизъюнктивными структурами. Зоны образуют структурные пары, причем те из них, которые наиболее отчетливо выражены во всех изученных полях (I_{22} – I_{21} и I_{12} – I_{11}), расположены настолько близко друг к другу, что две аномалии на некоторых графиках объединяются в одну с двумя близко расположенными экстремумами.

На глубине (рис. 2, г) это проявлено в виде широких областей с очень низким (4–30 Ом·м) сопротивлением, представленных обводненными, вследствие высокой нарушенности, участками земной коры. Один из них располагается под центральной частью Предбайкальского прогиба, тогда как другие наблюдаются на юго-восточном фланге профиля. Две из трех пар межблоковых зон, объединяющихся по данным малоглубинных методов (I_{32} – I_{31} и I_{12} – I_{11}), выделяются в виде широких полос минимальных УЭС. В отличие от них Приморская зона (участки I_{22} – I_{21}) маркируется у поверхности лишь небольшим минимумом под Приморским сбросом. Выявление причин отмеченной особенности может быть темой отдельного исследования. С другой стороны, выраженность Приморского сброса эскарпом в сотни метров, а также тот факт, что амплитуда кайнозойских вертикальных перемещений по нему превышает 2 км, не оставляют сомнений в существовании данного разлома и на глубине.

Таким образом, весь юго-восточный фланг профиля п. Баяндай – м. Крестовский пересечен крупнейшей межблоковой зоной 2-го иерархического уровня (напомним, что за структуру 1-го порядка принят Байкальский рифт в целом). Эту зону, вслед за авторами работы [Мац и др., 2001], логично именовать Обручевской разломной системой; согласно приведенным в настоящей статье данным, ее поперечные размеры составляют около 50 км. Система имеет иерархичное строение и представлена Прихребтовой, При-

морской и Морской межблоковыми зонами (3-й уровень), каждая из которых состоит из двух более мелких зон 4-го уровня иерархии (рис. 2, а). Обручевская система образует северо-западное плечо Байкальского рифта и контактирует с крупным слабо нарушенным блоком, другой границей которого служит Предбайкальская межблоковая зона, причем два последних структурных элемента относятся к платформе.

Аналогичная интерпретация данных по профилю с. Кудара – с. Тарбагатай приводит к выводу о наличии соответствующей иерархии межблоковых зон и в пределах восточного плеча Байкальского рифта (рис. 3, а). На уровне Обручевской разломной системы здесь выделяются Черско-Баргузинская и Джидино-Витимская межблоковые зоны, между которыми располагается Хамардабанский блок, что соответствует составленной ранее схеме зонно-блоковой структуры Прибайкалья (рис. 1, б). Это подразумевает отнесение на данном этапе исследования Джидино-Витимской зоны к Байкальскому рифту. Данное предположение согласуется с результатами GPS-геодезии [Саньков и др., 2009], а также материалами по распространению поля умеренной сейсмичности от береговой части оз. Байкал на юго-восток [Суворов, Тубанов, 2008; Семинский и др., 2008б; Sherman, Zlogodukhova, 2011]. В свою очередь, каждая из крупных межблоковых зон состоит из двух аналогичных структур 3-го уровня иерархии, единство которых отчетливо отражено в интервале больших глубин на геоэлектрическом разрезе (рис. 3, з). Характер пространственного изменения параметров некоторых полей свидетельствует о наличии межблоковых зон 4-го иерархического уровня, хотя в пределах восточного профиля они проявлены менее отчетливо по сравнению с западным плечом Байкальского рифта.

Таким образом, комплексный анализ полевых структурно-геологических, геофизических, геоморфологических и гидрогеологических материалов подтверждает особенности взаимоотношения зон и блоков, выявленные при составлении схемы зонно-блоковой структуры Прибайкалья на основе трехмерной модели рельефа (рис. 1, б). Реконструкция иерархии зонно-блоковой структуры центрального Прибайкалья оказалась возможной благодаря использованию эффективных методов исследования. Успеху исследований благоприятствовал и тот факт, что поля, наблюдаемые над межблоковыми зонами, контролируются преимущественно структурой земной коры, а не вещественным составом слагающих ее пород. Такая ситуация не типична, поэтому для выделения разноранговых зон взаимодействия блоков в пределах и на флангах Байкальской рифтовой системы можно рекомендовать комплекс методов, апробированных авторами настоящей статьи.

Линеаментный анализ рельефа позволяет выявить участки с высокой

степенью нарушенности приповерхностной части земной коры. *Электрофилирование и магнитотеллурическое зондирование* дают возможность выделить и оконтурить в широком диапазоне глубин проводящие зоны, которые представлены участками земной коры, раздробленными в результате блоковых взаимодействий и проницаемыми для водных растворов. Отрицательными аномалиями *естественного электрического поля* выделяются древние разломы с графитовой минерализацией, по которым нередко происходят современные тектонические перемещения. *Эманиационная съемка* выделяет глубокие зоны интенсивной дегазации, причем локальные максимумы и минимумы объемной активности радона маркируют положение отдельных сместителей с проницаемыми или непроницаемыми для газа тектонитами. Кроме перечисленных методов, комплекс включает полевые *геолого-структурные, геоморфологические и гидрогеологические исследования*, позволяющие на основе наблюдений в отдельных точках определить природу и тектонические характеристики зон, выделенных геофизическими методами.

Заключение

На основе интерпретации большого объема геолого-геофизических данных, полученных комплексом методов на профилях п. Баяндай – м. Крестовский и с. Кудара – с. Тарбагатай, выявлена картина нарушенности земной коры плечевых частей Байкальского рифта и впервые установлено ее соответствие теоретическим представлениям о зонно-блоковой структуре литосферы. Опыт, приобретенный в ходе этих исследований, позволяет рекомендовать рассмотренный комплекс методов в качестве эффективного инструмента для выявления активных межблоковых зон земной коры.

Работами в центральном Прибайкалье показано, что изученная территория представлена чередованием двух типов участков, соответствующих широким подвижным зонам и сравнительно стабильным блокам земной коры. Зоны взаимодействия блоков отличаются повышенной плотностью разрывов, понижениями в рельефе, аномалиями условий водообмена, положительными и сложными по форме газовыми аномалиями, а также низкими значениями удельного электрического сопротивления как вблизи поверхности (данные ЭП), так и на глубине (данные МТЗ). Взаимное положение и соотношение размеров межблоковых зон свидетельствуют об их строгой иерархической соподчиненности.

К главным межблоковым зонам центрального Прибайкалья относятся Обручевская, Черско-Баргузинская и Джидино-Витимская разломные системы, первая из которых представляет западное, а вторая и третья — восточное плечи Байкальского рифта. На следующем уровне иерархии выделяются

Морская, Приморская, Прихребтовая, Дельтовая, Бортовая и другие меж-блоковые зоны, трассирующиеся из глубин в десятки километров и расширяющиеся у поверхности за счет появления более мелких структур аналогичного типа. Вследствие этого нарушенные участки превышают одноранговые блоки по размерам в пределах разломных систем, которые в данном случае выступают в качестве гигантских аналогов сбросов, обеспечивающих растяжение земной коры Прибайкалья в ходе рифтогенеза.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны руководителю программы СО РАН ОНЗ-7, академику РАН М.И. Эпову и заведующему лабораторией геоэлектрики ИНГГ СО РАН канд. техн. наук Е.Ю. Антонову за неизменные поддержку, внимание и интерес к полученным результатам. Выполнение геолого-геофизических съемок было бы невозможным без технической и организационной поддержки Иркутского электроразведочного предприятия и в первую очередь его генерального директора, канд. техн. наук Ю.А. Агафонова. В проведении различных геофизических работ активное участие принимали сотрудник НППГА «Луч» Ю.Н. Колычев, сотрудники лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН Р.М. Зарипов и А.С. Черемных, а также студенты-геофизики Читинского государственного университета под руководством канд. геол.-мин. наук Д.Л. Авгулевича, которым авторы статьи выражают искреннюю благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

- Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Кошурников А.В.* Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне // *Физика Земли*. 1999. № 10. С. 3–25.
- Карта новейшей тектоники юга Восточной Сибири. Масштаб 1:1500 000 / Ред. А.Г. Золотарев и П.М. Хренов, 1979.
- Кожевников Н.О.* Некоторые особенности структуры Приольхонья по данным электроразведки (Западное Прибайкалье) // *Геология и геофизика*. 1998. Т. 39, № 2. С. 271–276.
- Кожевников Н.О., Бигалке Ю., Кожевников О.К.* Региональная структура Приольхонья по данным геоэлектрических исследований // *Геология и геофизика*. 2004. Т. 45, № 2. С. 253–265.
- Комаров В.А.* Геоэлектрохимия: Учебное пособие. СПб., 1994. 136 с.
- Красный Л.И.* Глобальная делимость литосферы в свете геоблоковой концепции // *Советская геология*. 1984. № 7. С. 17–32.
- Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П. и др.* Недра Байкала (по сейсмическим данным). Новосибирск: Наука, 1981. 105 с.

- Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю. и др. Современная геодинамика Байкальского рифта // Разведка и охрана недр. 1997. № 1. С. 10–20.
- Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 5. С. 391–406.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2009. 316 с.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 252 с.
- Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Ломоносов И.С. и др. Гидрогеология Прибайкалья. М.: Наука, 1968. 170 с.
- Попов А.М. Результаты глубинных магнитотеллурических зондирований в Прибайкалье в свете данных других геофизических методов // Физика Земли. 1989. № 8. С. 31–37.
- Поспеев В.И., Михалевский В.И. Исследования на юге Сибирской платформы и в Байкальской рифтовой зоне // Исследования теплового и электромагнитного полей в СССР. М.: Наука, 1975. С. 121–127.
- Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 171 с.
- Резанов И.Н., Татков Г.И., Коломиец В.Л. и др. Региональное поле напряжений и сейсмоактивная тектоника Усть-Селенгинской впадины // Эволюция тектонических процессов в истории Земли. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. Т. 2. С. 106–109.
- Ружич В.В. Сейсмотектоническая деструкция в земной коре Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 144 с.
- Садовский М.А., Нерсесов И.Л., Писаренко В.Ф. Иерархическая дискретная структура литосферы и сейсмический процесс // Современная тектоническая активность Земли и сейсмичность. М.: Наука, 1987. С. 182–191.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. и др. Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // Докл. РАН. 2009. Т. 424, № 5. С. 664–668.
- Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л.: Недра, 1980. 446 с.
- Семинский К.Ж. Тектонофизические закономерности деструкции литосферы на примере Гималайской зоны сжатия // Тихоокеанская геология. 2001. Т. 20, № 6. С. 17–30.
- Семинский К.Ж. Картирование разломно-блоковой структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // Геофизический журнал. 2005. Т. 27, № 1. С. 85–96.
- Семинский К.Ж. Иерархия зонно-блоковой структуры литосферы Центральной и Восточной Азии: соотношения между размерами подвижных зон и блоков на разных уровнях иерархии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 10. С. 1018–1030.

- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В. и др. Структура разломных зон Приольхонья (Байкальский рифт) по данным полевой тектоно- и геофизики // Изв. Сиб. отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2008а. Вып. 7 (33). С. 111–124.
- Семинский К.Ж., Радзиминович Я.Б., Кожевников Н.О. Латеральная зональность центральной части Саяно-Байкальского сейсмического пояса // Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Петрозаводск: КНЦ, 2008б. С. 179–183.
- Скляр Е.В., Федоровский В.С., Склярова О.А. и др. Гидротермальная активность в Байкальской рифтовой зоне: горячие источники и продукты отложения палеотерм // Докл. РАН. 2007. Т. 412, № 2. С. 257–261.
- Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне / Замаараев С.М., Васильев Е.П., Мазукабзов А.М. и др. Новосибирск: Наука, 1979. 126 с.
- Суворов В.Д., Тубанов Ц.А. Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под центральным Байкалом // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 8. С. 805–818.
- Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск: Наука, 1977. 102 с.
- Яковлев А.В., Кулаков И.Ю., Тычков С.А. Глубина Мохо и трехмерная структура сейсмических аномалий земной коры и верхов мантии в Байкальском регионе по данным локальной томографии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 2. С. 261–282.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G. et al. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. V. 282. P. 1–38.
- Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V. The Olkhon geodynamic proving ground (Lake Baikal): high resolution satellite data and geological maps of new generation // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. Vol. 1, No. 4. P. 331–418.
- Kozhevnikov N.O., Tezkan B. The main structure and tectonic features of the Chernorud-Mukhor site on the western shore of Lake Baikal from TEM and SP measurements // J. Appl. Geophys. 1998. V. 39 (4). P. 237–250.
- Schulz S.E., Evans J.P. Mesoscopic structure of the Punchbowl Fault, Southern California and the geologic and geophysical structure of active strike-slip faults // J. Struct. Geol. 2000. Vol. 22. P. 913–930.
- Sherman S.I., Zlogodukhova O.G. Seismic belts and zones of the Earth: Formalization of notions, positions in the lithosphere, and structural control // Geodynamics & Tectonophysics. 2011. Vol. 2, No. 1. P. 1–34.
- Structural and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: North-Eastern segment (Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480) / Ed. E.V. Sklyarov. Irkutsk: IES SB RAS, 2005. 291 p.
- Unsworth M.J., Malin P.E., Egbert G.D. et al. Internal structure of the San Andreas Fault at Parkfield // Calif. Geology. 1997. Vol. 25. P. 359–362.
- Weber M., Abu-Ayyash K., Abueladas A. et al. Anatomy of the Dead Sea Transform from lithospheric to microscopic scale // Rev. Geophys. 2009. V. 47. P. 1–44.