

Основные черты глубинной морфологии Байкало-Становой тектонической зоны по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов

Представлены результаты комплексного изучения морфологии разрывных нарушений Байкало-Становой сдвиговой зоны в разрезе профиля 1-СБ. Сделаны принципиально новые выводы о глубинном строении земной коры региона, ключевую роль в котором играют разноглубинные субгоризонтальные зоны деструкции. Анализ распределения очагов землетрясений и глубинной морфологии разломов свидетельствует о том, что данные зоны могут не только накапливать субгоризонтальные проскальзывания сегментов земной коры, но и отождествляться со слоями хрупкопластичного перехода.

Ключевые слова: *геотектоника, Байкало-Становая сдвиговая зона, сдвиговые дислокации, сейсмичность.*

A. S. AGEEV (VSEGEI), A. S. EGOROV (SPMU)

The main deep morphology features of the Baikal-Stanovaya shear zone according to results of the interpretation geological and geophysical data

The article shows comprehensive research of Baikal-Stanovaya tectonic zone and the morphology of dislocations by interpretation of geological and geophysical data along 1-SB profile. Essential results of this work are linked with subhorizontal zones of crust destruction which identified at different depth. These zones can provide as subhorizontal slip as the layer of changing brittle-ductile deformations.

Keywords: *geotectonics, The Baikal-Stanovaya shear zone, the shear dislocation, seismic activity.*

Региональные сдвиговые зоны – объект повышенного интереса во всем мире. Они активно изучаются геологическими службами России, США, Германии в связи с их высокой структурно-формирующей ролью и сейсмичностью.

Одной из наиболее протяженных и сейсмически активных зон на территории нашей страны является Байкало-Становая региональная сдвиговая зона (БСРСЗ), протянувшаяся от оз. Байкал в восток-северо-восточном направлении до побережья Охотского моря. Строение БСРСЗ и ее роль в эволюции тектонических процессов региона особо отмечены Ю. Г. Гатинским, Д. В. Рундквистом и их коллегами, рассматривающими эту неоген-антропогенную тектоническую зону в качестве «границы литосферных плит, находящуюся на начальном этапе формирования» [2]. Анализ комплекса геологических, геофизических и дистанционных материалов, выполненный вдоль полосовых зон опорных геофизических профилей (геотраверсов), позволяет сформулировать ряд новых принципиальных выводов об особенностях глубинного строения земной коры БСРСЗ. Полученные материалы дали возможность сопоставить параметры морфологии региональной сдвиговой зоны Дальнего Востока России (в сечениях профилей 1-СБ, 3-ДВ) с аналогичными данными таких известных структур мира, как тектоническая зона Сан-Андреас, Рейнский грабен, Анатолийская зона дислокаций и др.

Фактологическая основа. На начальном этапе исследований был составлен рабочий банк

геолого-геофизических данных, включавший в себя как результаты площадных геологических, геофизических и дистанционных съемок (гравиразведка, магнитометрия и др.), так и данные, полученные при обработке опорных геофизических профилей (сейсмические разрезы глубинного МОВ, магнитотеллурические разрезы и др.). Основополагающим источником для изучения морфологии тектонических нарушений БСРСЗ является государственная геологическая карта масштаба 1 : 1 000 000. Важную информацию несут того же масштаба площадные карты поля силы тяжести и аномального магнитного поля. Карты дополнены рассчитанными трансформантами, ориентированными на наиболее детальное прослеживание тектонических нарушений на поверхности (расчет градиентов, псевдорельеф). В составе комплекса геолого-геофизических данных отметим особое значение данных разномасштабных тектонических и неотектонических основ [3, 10]. Совокупность этих материалов в сочетании с сейсмологическими данными, результатами геотермических исследований, а также космическими снимками создают основу для картографирования тектонических дислокаций БСРСЗ на дневной поверхности.

Комплекс материалов геофизических исследований вдоль опорных геофизических профилей Востока России (1-СБ, 3-ДВ) позволяет с большой степенью достоверности моделировать глубинную морфологию сдвиговых дислокаций. Принципиальную информацию о структурно-вещественных характеристиках земной коры несут данные метода

отраженных волн общей глубинной точки (МОВ-ОГТ), рассчитанные в показателях рефлексивности (число рефлекторов на единицу площади) с использованием инструментов пространственного анализа программы ArcMap. Расчет глубинных моделей потенциальных полей и анализ данных геоэлектрических исследований позволяют в свою очередь более обоснованно судить об изменении физических параметров горных пород в земной коре и выделять активные тектонические зоны.

Методическая основа исследований. Базовым аспектом в изучении глубинного строения Байкало-Становой тектонической зоны является трассирование сдвиговых дислокаций на дневной поверхности. В работе [1] освещены методика обработки и интерпретация площадных геолого-геофизических данных, полученная тектоническая схема отражает пространственное распределение тектонических нарушений в области развития БСРСЗ. На следующем этапе нами была поставлена задача уточнения положения сдвиговых дислокаций в пределах исследуемой области. В связи с этим в состав методической схемы качественной интерпретации изображений была привлечена процедура автоматического линейamentного анализа, реализованного в программе PCI Geomatica [13]. Для анализа использована единая скомпонованная

дистанционная основа (Landsat 7, 100 × 100 м, комбинация из 7–4–2-х каналов), полностью покрывающая исследуемую территорию. Рассчитанное поле линейamentов впоследствии верифицировалось визуально с учетом данных геологического картирования, тектонических моделей, данных сейсмологических и неотектонических исследований. Уточненная схема пространственного распределения неоген-антропогенных дислокаций БСРСЗ (рис. 1) позволила сделать заключение о дискретном характере проявления магистрального шва, а также об обширном проявлении синтетических и антитетических сколов. Полученная картина оперяющих дислокаций практически по всей зоне хорошо согласуется с теоретической моделью «эллипсоида деформации» левостороннего сдвига [9].

Изучение глубинной морфологии зоны БСРСЗ отвечало методологическим принципам, изложенным ранее в [1]. Исходными материалами для обработки и комплексного анализа на данном этапе стали геофизические разрезы вдоль опорного профиля 1-СБ.

Особенности глубинного строения БСРСЗ в полосе опорного геофизического профиля 1-СБ. Профиль 1-СБ (1250 км) пересекает тектоническую зону БСРСЗ в север-северо-западном направлении

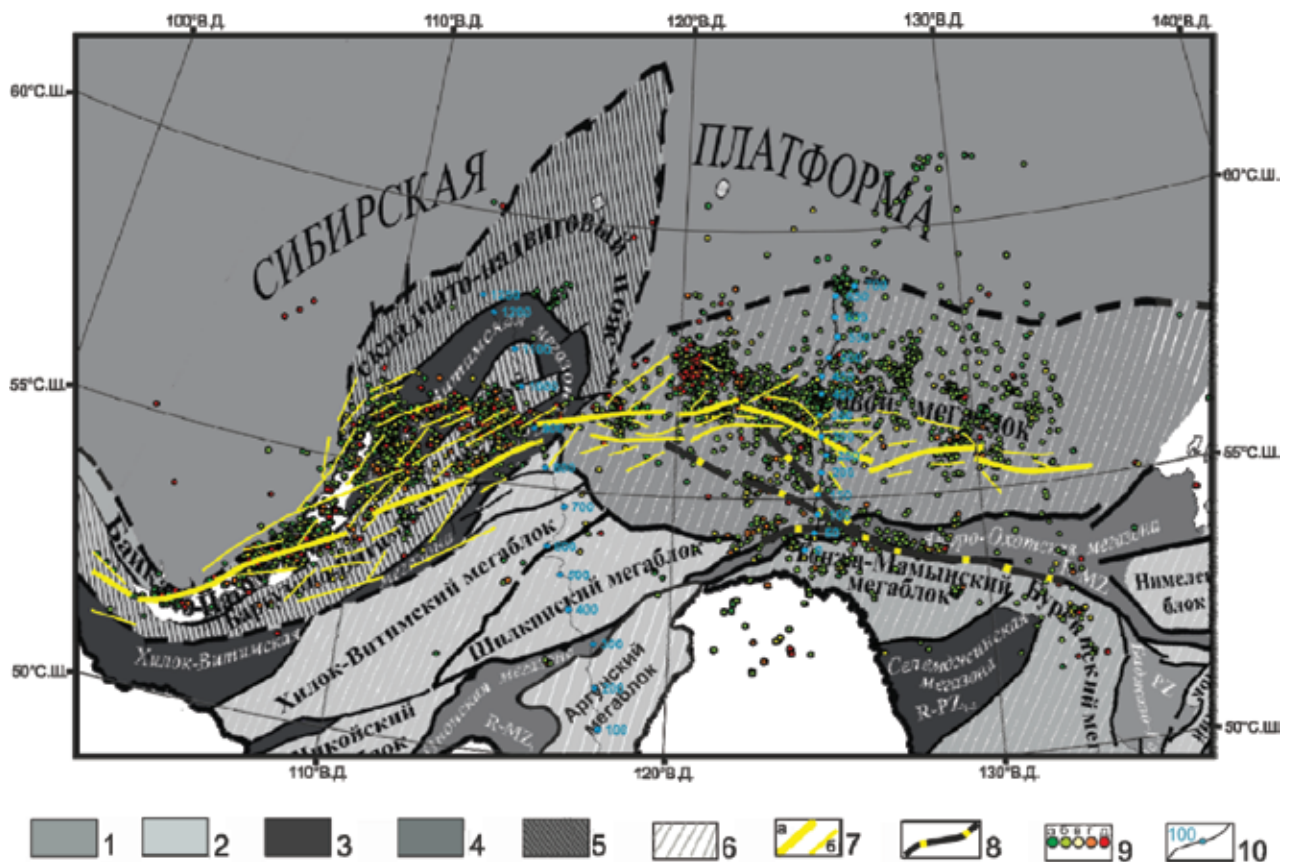


Рис. 1. Положение Байкало-Становой тектонической зоны относительно доминирующих тектонических структур Забайкальского региона

1, 2 – блоки с древней корой континентального типа (1 – Сибирской платформы, 2 – фанерозойских складчатых областей); 3, 4 – межблоковые сутурные зоны (3 – эпикаледонские, 4 – эпикиммерийские); 5, 6 – ареалы развития складчато-надвиговых деформаций окраин блоков с древней корой континентального типа (5 – эпикаледонские, 6 – эпикиммерийские); 7 – тектонические дислокации Байкало-Становой сдвиговой зоны (а – магистральный разлом, б – второстепенные); 8 – древние тектонические швы, активизированные современными подвижками; 9 – очаги землетрясений за период наблюдений с 1963 по 2015 г. с магнитудой более 3,5 на глубинах (км): а – 0–5, б – 5,1–12, в – 12,1–18, г – 18–29, д – более 30; 10 – трассы опорных геофизических профилей 1-СБ, 3-ДВ

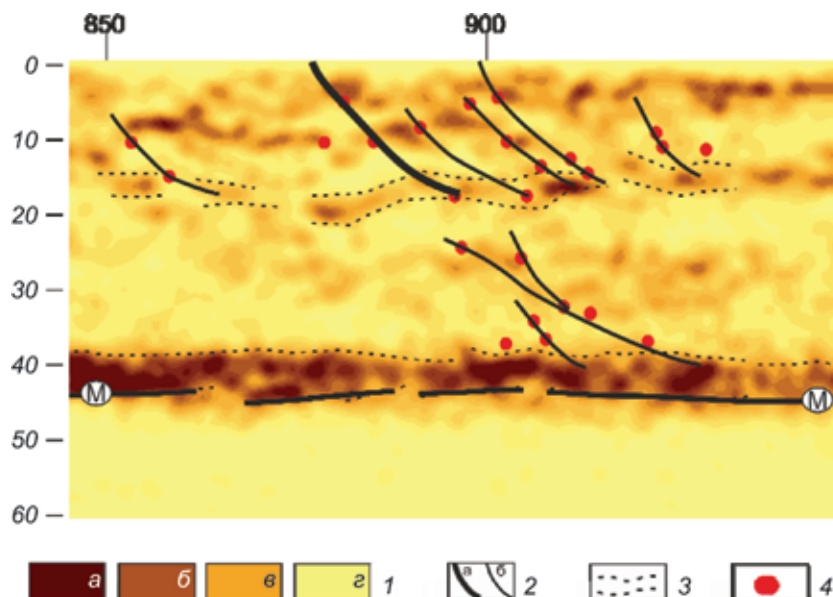


Рис. 2. Глубинная морфология дислокаций Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны в разрезе профиля 1-СБ

1 – количественные показатели наличия отражающих площадок на единицу площади сечения, рефлексивность: *a* – высокая, *б* – повышенная, *в* – умеренная, *г* – низкая; 2 – тектонические нарушения (*a* – главный шов, *б* – второстепенные дислокации); 3 – пачки повышенного количества высокоамплитудных рефлекторов; 4 – очаги землетрясений [7]

(вкрест простирания) в районе меридиана 118° в. д. Выделенные на дневной поверхности сдвиговые дислокации тектонической зоны в месте ее пересечения с профилем 1-СБ локализируются на обширной территории до 110 км в ширину.

Основой для моделирования структурно-вещественных неоднородностей земной коры является сейсмический разрез глубинного МОВ-ОГТ, обработка которого в показателях рефлексивности позволяет установить области повышенной рефлексивности, а также сейсмически прозрачные зоны. Мировой и отечественный опыт сейсморазведочных исследований в районах сверхглубоких скважин (СГ-3, КТБ) свидетельствует о том, что наклонные пачки повышенного количества рефлекторов часто маркируют зоны тектонических нарушений [5].

Неожиданный результат получен при сопоставлении трасс разрывных нарушений с расположением очагов землетрясений (на плоскость разреза проецировались очаги, расположенные на расстоянии не более 3 км). Это подтверждает листрическую морфологию дислокаций с их общей северной вергентностью (рис. 2). При совместном анализе распределения высокореклексивных пачек и очагов сейсмичности установлено наличие двух разноглубинных доменов локализации землетрясения в земной коре. Первый из них затрагивает верхнюю и среднюю кору до глубины 20 км. Любопытны факты корреляции предельной глубины проявления сейсмичности в этом домене и расположения на сходном глубинном интервале повышенного количества отражающих площадок, образующих субгоризонтальную протяженную зону, в которой происходит выполаживание (замыкание) тектонических нарушений. Отсутствие очагов сейсмичности ниже этой зоны на значительном интервале делает неоднозначным

наличие и прослеживание трасс разломов. В связи с этим возможно предположить верхне/среднекоревый генезис выделенных на дневной поверхности тектонических нарушений.

Второй сейсмический домен располагается на глубинах 23–40 км и накапливает в себе более глубинные подвижки земной коры. Моделированием установлено выполаживание трассы главного шва и второстепенных дислокаций в области субгоризонтальной зоны сгущения высокоотражающих площадок, выделенной на глубине 38–43 км. Нижняя кромка данного слоя отождествляется с границей Мохо (М). Разломы более пологой формы наследуют вергентность тектонических нарушений, выделенных в первом сейсмическом домене.

Наиболее интересны в числе полученных результатов субгоризонтальные зоны повышенной рефлексивности. Они свидетельствуют о том, что выделенные нами на разных глубинных уровнях земной коры высокореклексивные зоны могут быть ареалами пластических деформаций земной коры, на которых замыкаются разрывные дислокации листрической морфологии.

Значительные латеральные перемещения крупных коровых сегментов по субгоризонтальным ослабленным зонам обосновываются в работах М. Г. Леонова [4]. В аналитических исследованиях структур Сан-Андреас и Рейнский грабен [11, 12] мы выделили области «детачмента», по которым происходят «субгоризонтальные проскальзывания» слоев земной коры. На такой субгоризонтальной зоне на глубине 10–15 км замыкается даже региональный шов Сан-Андреаса. Нередко тектонические дислокации региональной сдвиговой зоны замыкаются на нескольких разноглубинных зонах тектонического проскальзывания.

Нами отмечена локализация большинства очагов землетрясений выше и ниже выделенных

высокорекорективных зон, что может свидетельствовать о том, что в слое деструкции происходит смена реологических свойств коры. Именно в них хрупкие деформации выше- и нижележащих сегментов сменяются упругопластичными. Слои хрупкопластичного перехода выделены в области развития тектонической зоны Сан-Андреаса [6, 7]. Развитие структур этого типа в земной коре БСРСЗ авторами данной статьи установлены ранее в сечении опорного геофизического профиля 3-ДВ [1].

Крупнейшие тектонические системы разрывных нарушений, такие как Сан-Андреас, БСРСЗ и Монголо-Охотский шов, проявляются как система многоэтажных листрических дислокаций, замыкающихся на разноглубинных слоях субгоризонтального проскальзывания смежных слоев.

Важный результат проведенных исследований – выделение разноглубинных цепочек высококорективных пачек, интерпретированных нами как субгоризонтальные зоны деструкции земной коры. Локализация большинства очагов землетрясений вне данных зон может свидетельствовать о приуроченности к этим зонам хрупкопластичного слоя. Наличие хрупкопластичного перехода в земной коре было ранее выделено в областях развития однотипных, наиболее известных и детально изученных тектонических зон мира.

1. Ageev A.S., Egorov A.S. Особенности глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны по геологическим, геофизическим и дистанционным данным в створе профиля 3-ДВ (Южный участок) // Регион. геология и металлогения. 2017. № 70. – С. 36–41.

2. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Блоки и геофизические поля Южной Сибири и прилегающих стран // Фундаментальные и прикладные вопросы геонаук. 2015. № 2. – С. 72–77.

3. Егоров А.С., Смирнов О.Е., Винокуров И.Ю., Каленич А.П. Сходство и отличия в строении Уральской и Пайхой-Новоземельской складчатых областей // Зап. Горного института. Т. 200. 2013. – С. 34–42.

4. Леонов М.Г. Тектоника консолидированной коры // Труды Геофизического института. Вып. 575. 2008. – 475 с.

5. Минц М.В., Колтаков Н.И., Ланев В.С., Русанов М.С. О природе субгоризонтальных сейсмических границ в верхней части земной коры (интерпретация данных бурения Кольской сверхглубокой скважины) // Геотектоника. 1987. № 5. – С. 62–72.

6. Николаевский В.Н., Шаров В.И. Разломы и реологическая расчлененность земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 1. – С. 16–28.

7. Оперативный сейсмологический каталог Геофизической службы Российской академии наук 1963–2015. URL: <http://ebooks.wdcb.ru/2013BS010/2013BS010.pdf> (10.05.2017).

8. Романюк Т.В., Власов А.Н., Мнушкин М.Г. и др. Реологическая модель и особенности напряженно-деформированного состояния региона активной сдвиговой разломной зоны на примере разлома Сан-Андреас. Ст. 2. Тектонофизическая модель литосферы региона разлома Сан-Андреас // МОИП. Отд. геол. 2013б. Т. 88. Вып. 2. – С. 3–21.

9. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео», 2003. – 244 с.

10. Трифонов В.Г., Леви К.Г., Лукина Н.В. и др. Карта активных разломов СССР и сопредельных территорий (с объяснительной запиской на рус. и англ. яз.). – Иркутск; Москва: ГУГК, ГИН АН СССР, 1987. – 50 с.

11. Brocher T.M., McCarthy J. et al. Seismic evidence for a lower-crustal detachment beneath San Francisco Bay. California // Science. 1994. Vol. 265. – P. 1436–1439.

12. Homuth B., Rumpker G., Deckert H., Kracht M. Seismicity of the northern Upper Rhine Graben – constraints on the present-day stress field from focal mechanisms // Tectonophysics. 2014. Vol. 632. – P. 8–20.

13. PCI/ 2009. Geomatica Version 10.3 Users Manual: PCI Geomatics Enterprises, Inc., Ontario, Canada, accessed September 29, 2011. URL: <http://www.pcigeomatics.com/>.

1. Ageev A.S., Egorov A.S. Features of the deep structure of the Baikal-Stanovoy regional shear zones on geological, geophysical and distantional data in the profile 3-DV (southern section) // Region. geologiya i metallogeniya. 2017. No 70, pp. 36–41. (In Russian).

2. Gatinsky Yu.G., Prokhorova T.V., Rundqvist D.V. Blocks and Geophysical Fields of Southern Siberia and adjacent countries. *Fundamental'nyj i prikladnye voprosy geonauk*. 2015. No 2, pp. 72–77. (In Russian).

3. Egorov A.S., Smirnov O.E., Vinokurov I.Yu., Kalenich A.P. Similarities and differences in the structure of the Ural and Pajha-Novaya Zemlya folded regions. *Notes of the Mining Institute*. 2013. Vol. 200. Pp. 34–42. (In Russian).

4. Leonov M.G. Tectonics of the consolidated crust. *Proceedings of the Geological Institute*. 2008. Iss. 575. 475 p. (In Russian).

5. Minc M.V., Kolpakov N.I., Lanev V.S., Rusanov M.S. On the nature of subhorizontal seismic boundaries in the upper part of the earth's crust (interpretation of drilling data from the Kola superdeep well). *Geotectonika*. 1987. No 5, pp. 65–72. (In Russian).

6. Nikolaevskij V.N., Sharov V.I. Riffs and rheological stratification of the earth's crust. *Izvestija AN SSSR, Fizika Zemli*. 1985. No 1, pp. 16–28. (In Russian).

7. Operativny seismologicheskij katalog Geofizicheskoy sluzby Rossiyskoy akademii nauk 1963–2015 [Operational seismological catalog of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Science 1963–2015]. URL: <http://ebooks.wdcb.ru/2013BS010/2013BS010.pdf> (10.05.2017).

8. Romanyuk T.V., Vlasov A.N., Mnuшкиn M.G. et al. Rheological model and features of the stress-strain state of the region of the active shear fault zone on the example of the San Andreas fault. Art. 2. Tectonophysical model of the lithosphere of the fault region of San Andreas. *MOIP, Dep. geol.* 2013b. Vol. 88. Iss. 2. Pp. 3–21. (In Russian).

9. Seminskiy K.Zh. Vnutrennyaya struktura kontinental'nyh razlomnyh zon. Tektonofizicheskij aspekt [Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. Filial «Geo». 2003. 244 p.

10. Trifonov V.G., Levi K.G., Lukina N.V. et al. Karta aktivnyh razlomov SSSR i sopredel'nyh territoriy (s ob'yasn. zap. na russk. i angl. yaz.) [Map of active faults of the USSR and adjacent territories (with explanatory note in Russian and English)]. Irkutsk; Moscow: GUGK, GIN AN SSSR. 1987. 50 p.

11. Brocher, T.M., McCarthy, J. et al. 1994: Seismic evidence for a lower-crustal detachment beneath San Francisco Bay. California. *Science*. Vol. 265. 1436–1439.

12. Homuth, B., Rumpker, G., Deckert, H., Kracht, M. 2014: Seismicity of the northern Upper Rhine Graben – constraints on the present-day stress field from focal mechanisms. *Tectonophysics*. Vol. 632. 8–20.

13. PCI/ 2009. Geomatica Version 10.3 Users Manual: PCI Geomatics Enterprises, Inc., Ontario, Canada, accessed September 29, 2011. URL: [at http://www.pcigeomatics.com/](http://www.pcigeomatics.com/).

Агеев Алексей Сергеевич – аспирант, инженер, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия. <Aleksei_Ageev@vsegei.ru>
Егоров Алексей Сергеевич – доктор геол.-минер. наук, профессор, декан геологоразведочного факультета, Санкт-Петербургский горный университет (СПГУ). 21-я линия, д. 2, Васильевский остров, Санкт-Петербург, 199106, Россия. <asegorov@spmi.ru>

Ageev Aleksei Sergeevich – Ph.D. Student, Engineer, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia. <Aleksei_Ageev@vsegei.ru>

Egorov Aleksei Sergeevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Dean of the Geological department of Saint Petersburg Mining University. 2, 21 line of Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106, Russia. <asegorov@spmi.ru>