

Особенности глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны по геологическим, геофизическим и дистанционным данным в створе профиля 3-ДВ (южный участок)

Ключевую роль в формировании современного сейсмологического режима Забайкальского региона играет Байкало-Становая сдвиговая зона (БСРСЗ) неоген-антропогенного возраста. Представлены результаты комплексного изучения особенностей БСРСЗ, полученные на основе специализированной обработки и интерпретации широкого комплекса геологических, геофизических и дистанционных методов. Уточнены и систематизированы закономерности пространственного распределения главной и второстепенных дислокаций БСРСЗ на дневной поверхности и в сечении опорного геофизического профиля 3-ДВ (южный участок).

Ключевые слова: *тектоника, Байкало-Становая региональная сдвиговая зона, сдвиги, сейсмичность.*

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

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)

Contemporary seismic character of this region was conditioned by neotectonic Baikal-Stanovaya regional strike-slip zone. The article shows comprehensive research of Baikal-Stanovaya zone and the depth structures these dislocations by the help with specialized data processes and interpretation of maps and cross-sections analysis. The patterns of main fault and secondary dislocations were structured and systematized. It helped to recognize some of particular qualities of Baikal-Stanovaya strike-slip zone at the surface and at the depth

Keywords: *tectonics, Baikal-Stanovoy regional shear zone, faults, seismicity.*

Байкало-Становая региональная сдвиговая зона (БСРСЗ), протянувшаяся от оз. Байкал в восток-северо-восточном направлении до побережья Охотского моря, привлекает внимание исследователей в связи с высоким уровнем сейсмичности (до 500 землетрясений в год) [2] и контрастным проявлением в рельефе (сочетание горных хребтов и заключенных между ними рифтовых впадин, в том числе оз. Байкал).

Изучению глубинного строения региона посвящено большое количество научных исследований (В. В. Стогний, Г. А. Стогний, Б. М. Козьмина, В. С. Имаева, Л. П. Имаевой, В. П. Солоненко [6–8, 12, 13]). В них отмечается чрезвычайно сложное глубинное строение региона, формирование которого обусловлено пространственным наложением разновозрастных орогенных процессов. Строение БСРСЗ и роль в эволюции тектонических процессов региона особо отмечены Ю. Г. Гатинским, Д. В. Рундквистом и их коллегами, которые рассматривают эту неоген-антропогенную тектоническую зону в качестве «границы литосферных плит, находящейся на начальном этапе формирования» [6].

Новый импульс в изучении глубинного строения земной коры региона придали исследования ВСЕГЕИ, СНИИГГиМС и ОП «Спецгеофизика», охватившие в начале XXI в. широкий комплекс работ в рамках национальных программ

Государственного геологического картирования и создания сети опорных геофизических профилей (геотраверсов). Эти материалы в сочетании с данными геофизических, дистанционных и неотектонических исследований [5, 14] позволяют на новом уровне оценить строение и генезис тектонических структур земной коры региона.

Узловую роль в этих исследованиях в составе комплекса геолого-геофизических данных, наряду с результатами геологического картирования, играют сейсмические разрезы глубинного метода отраженных волн (МОВ-ОГТ), глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), геоэлектрические разрезы (МТЗ), а также набор расчетных гравиметрических и магнитометрических моделей, выполненных авторами по площади региона и в сечении опорного профиля. Рабочий банк данных был дополнен комплектом дистанционных снимков (А. А. Кирсанов) и результатами сейсмологических наблюдений, заимствованных из Оперативного сейсмического каталога Геофизической службы РАН [9]. В ходе картографирования авторы учитывали результаты тектонофизических исследований М. В. Гзовского [3], К. Ж. Семинского [11] и неотектонических исследований, выполненных под руководством В. Г. Трифонова [14].

Научно-теоретические тектонофизические модели сдвиговых структур в общем случае отражают

сложную последовательность формирования главного сдвигового шва и оперяющих его дислокаций. На начальной стадии эволюции этой геоструктуры до появления магистрального разрыва развиваются многочисленные дислокации второго порядка [11]. Данный этап натурных наблюдений соответствует обособлению отдельных блоков земной коры и разделяющих их межблоковых зон, в которых локализуется большая часть очагов землетрясений. Дальнейший рост тектонических напряжений приводит к заложению главного шва, вдоль которого происходят наиболее высокоамплитудные сдвиговые перемещения блоков. Именно эта структура в дальнейшем начинает играть роль формирующейся границы литосферных плит. Магистральный разрыв на начальных этапах своего развития чаще всего имеет изогнутую форму с многочисленными оперяющими дислокациями. Его форма с течением времени постепенно выполаживается и стремится к прямолинейной [3].

Большое познавательное значение имели опубликованные данные о строении, составе и проявлении в геофизических и дистанционных полях самой известной в мире сдвиговой границы литосферных плит Сан-Андреас (Калифорния, США) [10]. Детальные комплексные исследования этой разломной зоны и сопоставление установленных

параметров ее глубинного строения с особенностями геолого-геофизического проявления глубинного строения БСРСЗ оказались очень продуктивными.

Картирование разрывных дислокаций БСРСЗ.

Выполненные исследования позволили выделить главную шовную структуру и закономерную систему оперяющих дислокаций БСРСЗ, а также определить границы геодинамического влияния этой зоны. Был проведен комплексный картографический анализ разнотипных карт региона, обработаны матрицы потенциальных геофизических полей с использованием статистических алгоритмов пакета программ ArcMap 10. Геологическая и дистанционная карты были подвергнуты линейментному анализу [1]. Сопоставление линейных особенностей геофизических полей и других карт и схем позволили выделить и проследить на площади магистрального разрыва от осевой части южного фланга оз. Байкал в восток-северо-восточном направлении до побережья Охотского моря (рис. 1). Шов дискордантно пересекает Баргузино-Витимский мегаблок, Байкало-Витимскую сутурную мегазону и далее трассируется в пределах Станового мегаблока. Магистральный разлом имеет изогнутую форму, а оперяющие дислокации зоны закономерно располагаются в областях его наибольших изгибов, что соответствует необходимым тектонофизическим

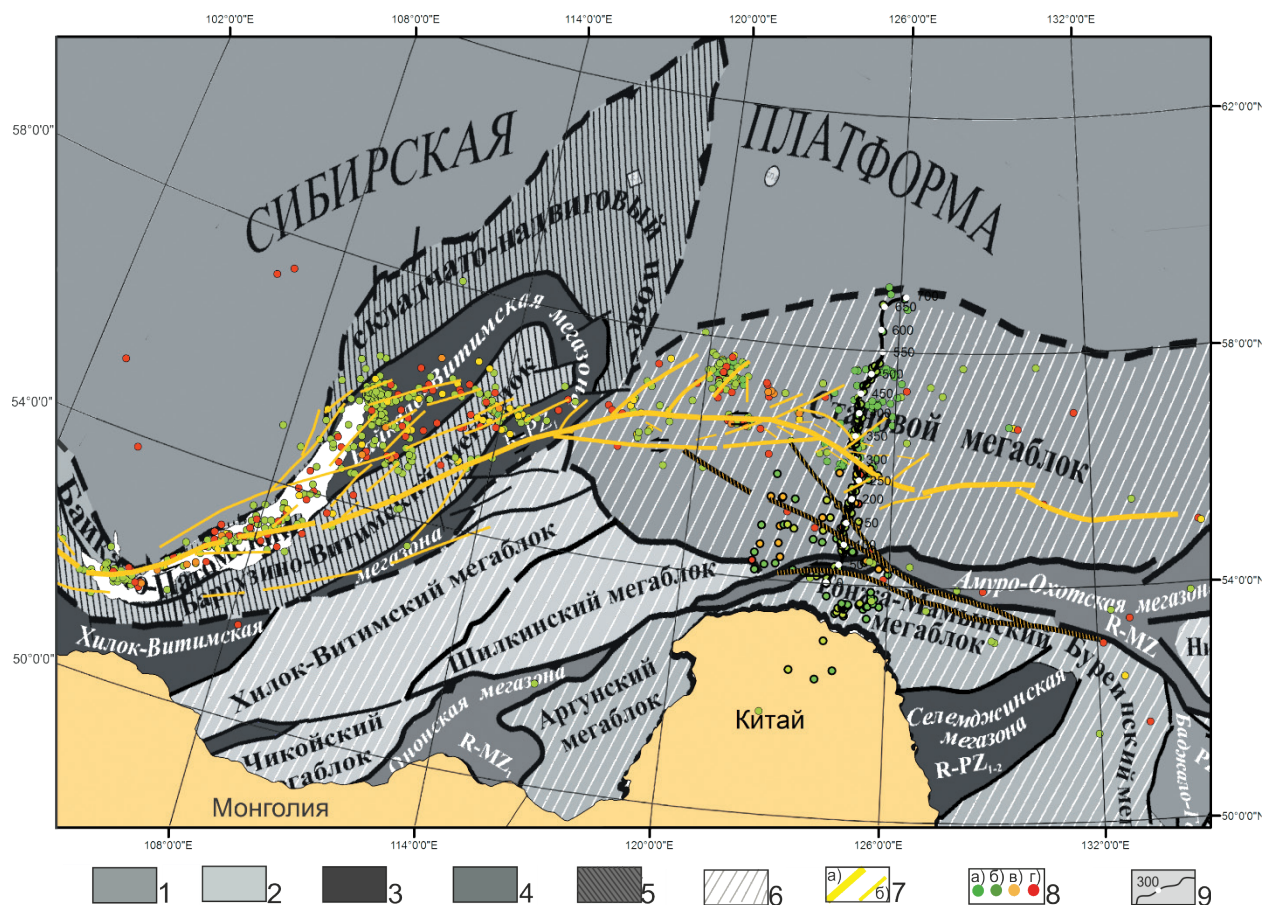


Рис. 1. Морфология неоген-антропогенных дислокаций Байкало-Становой сдвиговой зоны.

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 складчатых деформаций на окраинах блоков с древней корой континентального типа: 5 – эпикаледонские, 6 – эпикиммерийские; 7 – тектонические дислокации Байкало-Становой сдвиговой зоны: а – магистральный разлом, б – второстепенные тектонические дислокации; 8 – очаги землетрясений за период наблюдений с 1963 по 2015 г. с магнитудой более 3,5: а – 2–5 км, б – 5,1–10 км, в – 10,1–20 км, г – более 20 км [9] 9 – профиль 3-ДВ Южный участок

условиям, при которых возможно их заложение и развитие [11]. С учетом характера геологического проявления этой зоны предполагается ее неоген-антропогенный возраст. С опорой на закономерности пространственного расположения второстепенных тектонических дислокаций, описываемых моделью эллипсоида деформации, нами предполагается левосдвиговый характер сдвиговых дислокаций в БСРСЗ.

Глубинное моделирование разрывных дислокаций БСРСЗ в сечении опорного геофизического профиля 3-ДВ. Байкало-Становая региональная сдвиговая зона (БСЗСЗ) пересекается южным фрагментом опорного геофизического профиля 3-ДВ в направлении с юга на север (г. Сковородино – г. Томмот). Благодаря исследованиям в створе профиля открываются возможности для детального изучения глубинного строения Монголо-Охотского шва, Станового и Алданского геоблоков Сибирской платформы.

Используя один из алгоритмов статистического анализа пакета программы ИгсМар 10, авторы рассчитали разрез МОВ-ОГТ в показателях рефлексивности. Алгоритм обеспечивает расчет (в скользящем окне) числа отражающих площадок (рефлекторов) на единичной площади сечения. Этот разрез выявляет закономерности распределения в сечении профиля высокореклексивных и сейсмически прозрачных зон. Опыт ранее проведенных исследований района заложения Кольской сверхглубокой скважины свидетельствует о том, что наклонные высокореклексивные зоны чаще всего маркируют положение разрывных нарушений. Сопоставление сейсмических разрезов ГСЗ и глубинного МОВ-ОГТ в точках их пересечения свидетельствует о том, что регионально прослеживаемым границам разрезов ГСЗ (Мохоровичича) подошвы средней (K_2) и верхней (K_1) коры во многих случаях на разрезах МОВ-ОГТ отвечают нижние кромки субгоризонтальных высокореклексивных пачек. На исследуемой области в сечении профиля из их числа наибольший интерес представляет высокореклексивная пачка мощностью 3–5 км, прослеживаемая в базальной части верхней коры на глубинах от 9 до 16 км. Для изучения тектонической природы

этой пачки сопоставлены особенности сейсмического разреза 3-ДВ (в показателях рефлексивности) с закономерностями локализации очагов землетрясений (Оперативный сейсмологический каталог [9]). Кроме того, учтены данные магнитотеллурических исследований и разрезы псевдоплотностного и магнитного моделирования, рассчитанные с помощью алгоритма М. Б. Штокаленко [15].

Трассирование закартированного на дневной поверхности главного шва и второстепенных разломов на глубину выполнялось нами по положению отражающих площадок и наличию очагов землетрясений (рис. 2).

Согласно сейсмическим данным, эти разломы выполаживаются в пределах высокореклексивной пачки на глубинном интервале 9–18 км. Аналогичная закономерность локализации сейсмических очагов отмечена Т.В. Романюк при описании поведения дислокаций разломной зоны Сан-Андреас [13]. Авторы связывают приуроченность очагов землетрясений к нижней кромке слоя высокореклексивных площадок с наличием хрупкопластичного перехода (ХПП). Верхняя часть земной коры отвечает условиям хрупкой реологии и способна аккумулировать сейсмические события вдоль линейно протяженных разломных структур. Тогда как нижняя часть земной коры отвечает условиям упруго-пластичной либо упруговязкой реологии, при которой тектонические напряжения накапливаются в объеме горной породы [4].

Очень важной особенностью выделенных дислокаций является приуроченность к ним очагов землетрясений, которые можно объединить в цепочки, располагающиеся вдоль разломов на всем интервале глубинного прослеживания зоны.

Весьма дискуссионны физическая природа и тектоническая роль этой субгоризонтальной высокореклексивной пачки, которая в рассматриваемом сечении имеет куполообразную форму. Нижняя кромка пачки имеет выступ на глубинные отметки 14 км в центральной части БСРСЗ и опускание до глубин 20 км на ее флангах. Следует отметить, что эта куполовидная структура проявляется и на геоэлектрическом разрезе, построенном по данным МТЗ, на нем отмечается выступ низкоомных образований средней-нижней коры на фоне высокоомных комплексов верхнекорового гранитно-метаморфического слоя. На псевдоплотностном разрезе в осевой части БСРСЗ также намечается подъем высокоплотных образований средней-нижней коры. На магнитной модели этот купол проявляется как ареал повышенных значений псевдонамагниченности горных пород.

Моделирование разрывных дислокаций БСРСЗ в сечении средней-нижней коры представляется

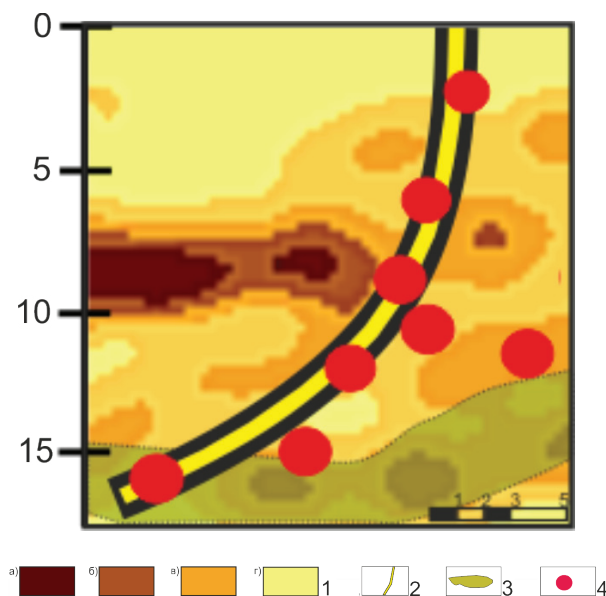


Рис. 2 Фрагмент сейсмического профиля 3-ДВ, иллюстрирующий листрический характер разрывных нарушений БСРСЗ и их выполаживание в зоне субгоризонтальной высокореклексивной пачки

1 – количественные показатели наличия отражающих площадок на единицу площади сечения, выраженных в рефлексивности: а – высокая; б – повышенная, в – умеренная, г – низкая; 2 – тектоническое нарушение; 3 – высокореклексивная зона, на которую замыкается тектоническое нарушение; 4 – очаги сейсмичности по [9]

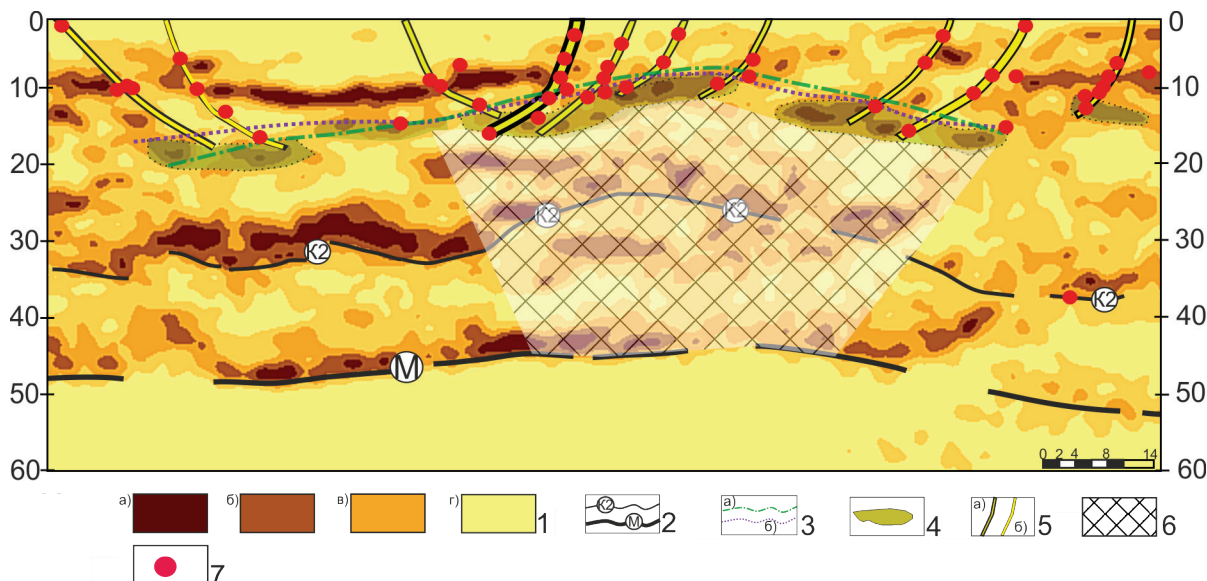


Рис. 3. Глубинная морфология дислокаций Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны

1 — количественные показатели наличия отражающих площадок на единицу площади сечения, выраженных в рефлективности: а — высокая; б — повышенная, в — умеренная, г — низкая; 2 — границы радиальной расслоенности земной коры, отвечающие нижним крамкам высокорективных пачек и соответствующих подошве средней коры (K2) и нижней коры (границе Мохоровичича М); 3 — контрастные физические границы, прослеживаемые на псевдоплотностном (а) и геоэлектрическом (б) разрезах; 4 — пачки повышенной рефлективности, на нижней кромке которых замыкаются разрывные нарушения БСРСЗ; 5 — тектонические нарушения: а — главный шов, б — второстепенные дислокации; 6 — зона глубинного канала шовной структуры; 7 — очаги землетрясений по каталогу [9]

ненадежным, поскольку отчетливые маркеры их проявления отсутствуют, и решение задачи их моделирования становится многовариантным. Вследствие этого авторы предлагают не трассировать отдельные разломы, а наметить положение зоны, в которой с наибольшей вероятностью локализуется главный канал системы дислокаций (рис. 3).

Комплексные исследования, выполненные авторами, дали следующие принципиальные результаты:

- Байкало-Становая региональная сдвиговая зона (БСРСЗ) дискордантно пересекает древние докембрийские блоки земной коры и простирается от южного фланга оз. Байкал до побережья Охотского моря. Магистральный разлом, контрастно проявляющийся в геофизических полях и на космических снимках, имеет сложную криволинейную морфологию и обширную систему опережающих дислокаций. Закономерности их пространственного расположения согласуются с тектонофизическими моделями левосторонних сдвигов;

- в сечении опорного геофизического профиля 3-ДВ тектонические дислокации БСРСЗ локализируются в пределах верхней коры. Эти разломы маркируются очагами землетрясений, которые можно объединить в цепочки, располагающиеся вдоль разломов на всем интервале ее глубинного прослеживания. Разломы имеют листрическую форму и замыкаются на высокорективную субгоризонтальную зону деструкции на глубинном интервале от 9 до 16 км;

- на рассматриваемом фрагменте разреза МОВ-ОГТ зона мощностью до 2–3 км имеет куполовидную форму и прослеживается на глубинах от 9 до 20 км. К ней также приурочены очаги землетрясений.

Положение и куполовидная морфология зоны проявляется на геоэлектрическом, псевдоплотностном и магнитном разрезах земной коры.

1. Агеев А.С. Егоров А.С. Морфология сдвиговых дислокаций неоген-антропогенного возраста Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны // Естественные и технические науки. 2017. №4. — С. 47–51.

2. Гатинский Ю.Г., Прохорова Т.В., Рундквист Д.В. Блоки и геофизические поля Южной Сибири и прилегающих стран // Фундаментальный и прикладные вопросы геонаук. 2015. №2. URL: elibrary.ru #25079598 (10.05.2017).

3. Изовский М.В. Основы тектонофизики. — М.: Наука, 1975. 536 с.

4. Егоров А.С., Смирнов О.Е., Винокуров И.Ю., Каленич А.П. Сходство и отличия в строении Уральской и Пайхой-Новоземельской складчатых областей // Записки Горного института. Т. 200. 2013. — С. 34–41.

5. Кирсанов А.А., Литвинова Т.П., Беляев Г.М. и др. Создание Атласа сводных карт для территории России // Известия ВСЕГЕИ. 2006. Т. 6 (54). 2008. — С. 48–60.

6. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Олекмо-Становой сейсмической зоны (Южная Якутия) // Литосфера. 2005. №2. С. 21–40.

7. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Активные разломы и сейсмоструктура Северо-Восточной Якутии. — Якутск: ЯНЦ СО АН СССР. 1990. 138 с.

8. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Якутии. — М.: ГЕОС, 2000. — 225 с.

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

10. 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.

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

12. Солоненко В.П., Тресков А.А., Курушин Р.А. и др. Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья. – М.: Наука, 1966. 230 с.

13. Стогний В.В., Стогний Г.А., Мишин В.М. Тектоническая расслоенность Алдано-Станового геоблока / Отв. ред. В.М. Мишин. РАН, Сиб. отд-ние, Ин-т геол. наук, Якут. гос. ун-т им. М.К. Аммосова. 1997. – 148 с.

14. Трифонов В.Г., Леви К.Г., Лукина Н.В. и др. Карта активных разломов СССР и сопредельных территорий (с объясн. зап. на русск. и англ. яз., 50 с.). Иркутск – М.: ГУГК, ГИН АН СССР, 1987.

15. Штокаленко М.Б., Алексеев С.Г., Козлов С.А. От избыточной эффективной плотности к абсолютной // Материалы 40-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. – М.: ИФЗ РАН, 2013. С. 380–384.

6. Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M. Seismotectonics of the Olekma-Stanovoi seismic zone (South Yakutia). *Litosfera*. 2005. No 2, pp. 21–40. (In Russian).

7. Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M. Aktivnye razlomy i seysmotektonika Severo-Vostochnoy Yakutii [Active faults and seismotectonics of North-Eastern Yakutia]. Yakutsk: YANC SO AN SSSR. 1990. 138 p.

8. Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M. Seysmotektonika Yakutii [Seismotectonics of Yakutia]. Moscow: GEOS. 2000. 225 p.

9. Operativnyy seysmologicheskii katalog Geofizicheskoy sluzhby Rossiyskoy akademii nauk 1963–2015 [Operational seismological catalog of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences 1963–2015]. <http://ebooks.wdcb.ru/2013BS010/2013BS010.pdf> (10.05.2017).

10. Romanyuk T.V., Vlasov A.N., Mnushkin 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).

11. Seminskiy K.Zh. Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon. Tektonofizicheskiy aspekt [Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. Filial «Gео». 2003. 244 p.

12. Solonenko V.P., Treskov A.A., Kurushin R.A. i dr. Zhivaya tektonika, vulkany i seysmichnost' Stanovogo nagor'ya [Live tectonics, volcanoes and seismicity of the Stanovoi Plateau]. Moscow: Nauka. 1966. 230 p.

13. Stogniy V.V., Stogniy G.A., Mishnin V.M. Tektonicheskaya rassloennost' Aldano-Stanovogo geobloka [Tectonic stratification of the Aldan-Stanovoi geoblock]. Ex. ed. V.M. Mishnin. RAN, Sib. otd-nie, In-t geol. nauk, Yakut. gos. un-t im. M.K. Ammosova. 1997. 148 p.

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

15. Shtokalenko M.B., Alekseev S.G., Kozlov S.A. From the excess effective density to the absolute. *Materials of the 40th session of the International Seminar named after D.G. Uspensky*. Moscow: IFZ RAN. 2013. Pp. 380–384 (In Russian).

Агеев Алексей Сергеевич – аспирант, инженер 2 кат., 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-Петербургского горного университета, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, 199106, Россия. <asegorov@spmi.ru>

Ageev Aleksey 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 St. Petersburg Mining University. 2, 21 line of Vasilievsky island, St. Petersburg, 199106, Russia. <asegorov@spmi.ru>