



SEISMOGEODYNAMIC FACTOR IN TRIGGERING OF DEBRIS FLOWS ON THE SOUTHERN SLOPES OF THE KODAR RIDGE

V. K. Laperdin¹, V. A. Sankov^{1, 2}, A. A. Dobrynina^{1, 3}

¹ *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*

² *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

³ *Geological Institute, Siberian Branch of RAS, Ulan-Ude, Russia*

Abstract: Potential triggering of mudflows by geodynamic and seismotectonic factors was assessed for the NE flank of the Baikal rift system, specifically for the junction area of the SW segment of the Chara depression, the Kodar ridge and the Muya-Chara inter-basin zone. The debris flow hazard in the study area is high due to geodynamic and seismotectonic activity and the regional permafrost, hydrological and climatic conditions. In 2001, debris flow damaged the railway section of the Baikal-Amur Mainline (BAM) on the northern shore of the Bolshoe Leprind lake. To ensure stable railway operations, BAM must be protected from landslides and debris flows. Appropriate preventive actions need to be developed with respect to the correctly assessed current state of the local natural environment, which results from complex interactions between endogenous and exogenous processes. In our study, the Late Cenozoic geodynamics, faulting and seismicity are considered as the most important factors for the occurrence of landslides and mudflows on the southern slopes of the Kodar ridge. The relief in the study area develops in geodynamic conditions predetermined by active stretching of the crust, accompanied by uplifting of the rift shoulder with a large height gradient. The study area is a narrow segment of the zone of dynamic influence of the Baikal rift system. It has a dense network of faults activated in the Late Cenozoic and the fault segments active in Holocene, as deformation caused by the divergent movements of the Siberian and Transbaikalia lithospheric blocks concentrates in this narrow zone. We studied several fault systems, including those activated in the Late Cenozoic, which are related to abundant zones of high fracturing, fragmentation and disintegration of rocks to dust-size particles, accompanied by the most intensive physical weathering in such zones. In the Chara depression and the surrounding uplifts, modern seismicity and paleoseismicity are determined by differentiated movements along the active faults. In the modern and Holocene stages, during and after frequent seismic shocks (including strong ones) in the study area, loose debris materials are intensely displaced by gravity, accumulate in negative-relief forms, and provide an important source of solids for debris flows. The Stanovoi Plateau is currently experiencing a period of intensified tectonic and seismic activity, which contributes to favorable conditions for the occurrence of mudflows.

Key words: seismogeodynamics; modern seismicity; paleoseismicity; mud-stone flow (mudslide); hazard; threat; Baikal rift system

RESEARCH ARTICLE

Recommended by E.A. Rogozhin

Received: October 10, 2015

Revised: May 5, 2017

Accepted: June 13, 2017

For citation: Laperdin V.K., Sankov V.A., Dobrynina A.A., 2017. Seismogeodynamic factor in triggering of debris flows on the southern slopes of the Kodar Ridge. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 933–947. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0325.

Для цитирования: Лапердин В.К., Саньков В.А., Добрынина А.А. Сейсмогеодинамический фактор формирования селей на южных склонах хребта Кодар // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 933–947. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0325.

СЕЙСМОГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СЕЛЕЙ НА ЮЖНЫХ СКЛОНАХ ХРЕБТА КОДАР

В. К. Лапердин¹, В. А. Саньков^{1, 2}, А. А. Добрынина^{1, 3}

¹ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

² Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

³ Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия

Аннотация: Работа посвящена оценке потенциала геодинамических и сейсмотектонических факторов развития селевых проявлений в районе сочленения юго-западной части Чарской впадины, поднятия хребта Кодар и Муйско-Чарской междувпадинной перемычки северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы, которые, наряду с мерзлотными, гидрологическими и климатическими условиями, определяют высокую степень селевой опасности территории. Последнее проявление селей наблюдалось в 2001 г. на участке трассы БАМ, проложенном по северному берегу оз. Большое Леприндо. Для обеспечения надежной работы магистрали необходима превентивная защита от селей, основанная на оценке современного состояния природной среды, являющейся «продуктом» сложного взаимодействия эндогенных и экзогенных процессов. Проведенное нами исследование позволяет рассматривать позднекайнозойскую геодинамику, разломообразование и сейсмичность как важнейшие факторы формирования условий для селеобразования на южных склонах хребта Кодар. Геодинамические условия образования рельефа территории определяются активным растяжением земной коры, сопровождающимся поднятием плеча рифта и формированием рельефа с большим градиентом высот. Район исследований находится в пределах участка сужения зоны динамического влияния Байкальской рифтовой системы, который характеризуется повышенной плотностью активизированных в позднем кайнозое разломов, а также их сегментов, активных в голоцене, что обусловлено концентрацией в узкой зоне деформаций, связанных с дивергентным движением Сибирского и Забайкальского литосферных блоков. Показано, что наличие нескольких систем разломов, в том числе активизированных в позднем кайнозое, определило широкое развитие зон повышенной трещиноватости, дробления и дезинтеграции пород, вплоть до тектонической муки, благодаря чему здесь более активно протекают процессы физического выветривания. Современная и палеосейсмичность Чарской впадины и окружающих ее поднятий определяются дифференцированными движениями по активизированным разломам. Высокий уровень и частота сотрясаемости территории на современном и голоценовом этапах приводят к интенсивному гравитационному перемещению рыхлого обломочного материала с формированием его запасов в отрицательных формах рельефа, являющихся важным источником твердой фазы селевых потоков. Территория Станового нагорья в настоящее время переживает период активизации тектонической и сейсмической деятельности, что способствует созданию благоприятных условий селеобразования.

Ключевые слова: сейсмогеодинамика; современная сейсмичность; палеосейсмичность; грязекаменный поток (сель); опасность; Байкальская рифтовая система

Твердо помнить должно, что видимые телесные
на Земле вещи и весь мир не в таком состоянии
были сначала от создания, как ныне находим,
но великие происходят в нем перемены.

М. Ломоносов

1. ВВЕДЕНИЕ

Хребет Кодар располагается в одном из селеопасных регионов России. Согласно классификации [Perov et al., 2017], район относится к Байкальской селевой провинции с высоким уровнем активности селевой деятельности. Одно из последних проявлений крупных селевых выбросов произошло в 2001 г. В предгорной части южного склона Кодар-

ского хребта, в прибрежной полосе озера Большое Леприндо, на конусах выносов постоянных и временных водотоков, относящихся к зоне повышенной опасности и риска, проходит участок 1658–1673 км перегона Кодар–Леприндо Восточно-Сибирской железной дороги (рис. 1). 27 июля 2001 г. на заключительной фазе семидневных фронтальных осадков и в результате выпадения ливней высокой интенсивности, охвативших верхние ча-

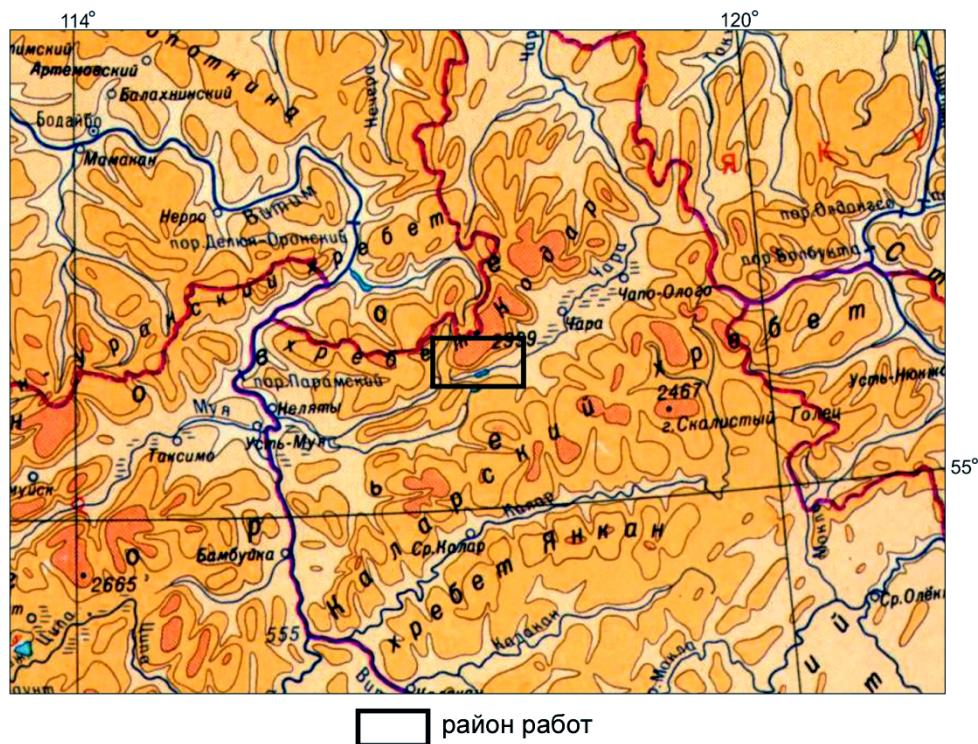


Рис. 1. Обзорная схема расположения селеопасного района.

Fig. 1. Schematic map showing the location of the debris flow hazard area.

сти бассейнов постоянных и временных водотоков, произошел массовый срыв оттаявшего слоя дисперсных отложений (в среднем 0.5 м). И, как следствие, сорвавшаяся насыщенная водой масса грунта, наращивая скорость, объем и энергию, устремилась вниз по крутопадающим (15–45°) тальвегам. В зоне ледниковых отложений, дополнительно обогатившись твердой составляющей и лесной растительностью, она продолжила движение в виде грязекаменных селевых потоков турбулентного характера. Грязекаменная масса, вышедшая одновременно из двух бассейнов и перемешанная с лесной растительностью, внезапно закупорила проемы мостов, заполнив придорожное пространство и перейдя насыпь железной дороги, и затем достигла озера Большое Леприндо. Результатом этого события была вынужденная задержка движения подвижного состава на время восстановления пути на данном участке железной дороги.

Сели южного склона хр. Кодар по генезису относятся к дождевым, а по механизму зарождения – к оползне-эрозионному типу. Движение грязекаменной селевой массы в верхней части бассейнов происходит в виде оползней-сплывов, которые, войдя в зону ледниковых отложений, трансформируются в водогазикаменные, перемешанные с древесной растительностью, турбулентные потоки. На данном участке БАМ для формирования селей сейсмо-

генного типа имеются условия лишь в бассейне реки Мергели. В бассейнах других рек нет морфологических условий для накопления воды в необходимом количестве в виде ледниковых или подпрудных озер. Известно, что проявление селей, их объемы, частота повторяемости и уровень риска в значительной степени зависят от интенсивности развития экзогенной группы процессов и характера техногенного преобразования геологической среды. Вместе с тем общие фоновые и прямые предпосылки селеформирования создаются также под влиянием геодинамических и сеймотектонических факторов. Настоящая работа посвящена оценке их потенциала как фактора развития селевых проявлений в районе сочленения юго-западной части Чарской впадины, поднятия хребта Кодар и Муйско-Чарской междувпадинной перемычки.

2. НЕОТЕКТЕНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СЕЛЕЙ

Основные предпосылки для интенсивной селевой деятельности в пределах хребта Кодар обусловлены сложным тектоническим развитием Станового нагорья [Solonenko, 1966]. Морфоструктурный анализ современного рельефа и изучение основных тенденций его развития в историческое

время показывают, что древние складчатые сооружения претерпели значительные изменения в результате тектогенеза, начавшегося во второй половине неогена и активно проявляющегося на протяжении четвертичного периода, включая современную эпоху.

К неоген-плейстоценовому времени территория сочленения Чарской впадины и хребта Кодар, благодаря процессам выравнивания, имела низкогорный рельеф со сглаженными формами, широкими долинами, заполненными продуктами разрушения и переноса горных пород. В конце неогена началось резкое оживление тектонических движений. В результате коробления земной поверхности возник разбитый зонами разрывных дислокаций обширный пологий свод, на фоне которого сформировались отдельные глыбовые поднятия, осложненные сбросами, а также впадинами второго и более высоких порядков. Движения происходили с различной амплитудой и направленностью. Наряду с активизацией древних тектонических швов возникали новые системы разломов. Такой характер тектогенеза обусловил блоковое строение территории с различной степенью раздробленности отдельных блоков, с наличием протяженных хребтов Удокан и Кодар и изолированной среди этих горных массивов Чарской котловины, которая заполнялась водой. Опускание отдельных блоков и воздымание других с их последующим разрушением привели к сложному ступенчатому строению современных форм хребта Кодар (рис. 2). В позднем плейстоцене в восточной части Муйско-Чарской перемычки возникли впадины озер Малое и Большое Леприндо.

3. РАЗЛОМЫ НЕОТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧАРСКОЙ ВПАДИНЫ И ОБРАМЛЯЮЩИХ ЕЕ ХРЕБТОВ

Озера Малое и Большое Леприндо расположены в юго-западной части Чарской впадины Байкальской рифтовой системы, в месте ее сочленения с Муйско-Чарской междувпадинной перемычкой. Начало формирования впадины относят к среднему миоцену [Logatchev, 1993; Enikeev, 2008]. Согласно представлениям В.В. Ружича [Ruzhich, 1980], наивысшая активность тектонических движений здесь проявилась в позднем плиоцене – плейстоцене. Высокая активность движений выражена в повышенной современной сейсмической активности Чарской впадины и окружающих поднятий и наличии палеосейсмогенных дислокаций [Soloviev, 1985; Solonenko, 1985]. В региональном плане район исследований находится в пределах участка сужения зоны динамического влияния северо-вос-



Рис. 2. Вершинная поверхность хр. Кодар. На данном участке вершины хребта представляют собой относительно выровненные остатки пенеплена, обрывающиеся на юг отвесными стенками каров и цирков, в данном случае являющихся истоками р. Мургели (26 июля 2015 г.).

Fig. 2. The Kodar ridge-top surface. In this area, the mountains are relatively levelled residues of the peneplain, with steep cliff walls of corries and cirques (in this case, the area of the Murgely river source) (July 26, 2015).

точного фланга Байкальской рифтовой системы (рис. 3). Этот участок характеризуется повышенной плотностью активизированных в позднем кайнозойе разломов, а также их сегментов, активных в голоцене, определяемых как палеосейсмодислокации. Высокая концентрация активизированных разломов обусловлена концентрацией в узкой зоне деформаций, связанных с относительным дивергентным движением Сибирского блока Северо-Евразийской литосферной плиты и Забайкальского блока Амурской литосферной плиты.

Разломы земной коры, являющиеся определяющим структурным элементом в процессе формирования рифта, широко распространены в пределах изучаемой площади. Они формируют борты рифтовых впадин, а также внутреннее строение впадин разного порядка и междувпадинных перемычек. В районе озера Большое Леприндо такую роль играют разломы северо-восточного, субширотного и северо-западного направления при преимущественном распространении первых (рис. 4). По мнению В.В. Ружича [Ruzhich, 1980], рассматривавшего гораздо более обширную прилегающую часть северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы, они входят в состав Байкальской, Становой и Северо-Западной систем активных разломов, соответственно. Образование этих систем разломов происходило за счет активизации древних разрывных нарушений, первоначальная

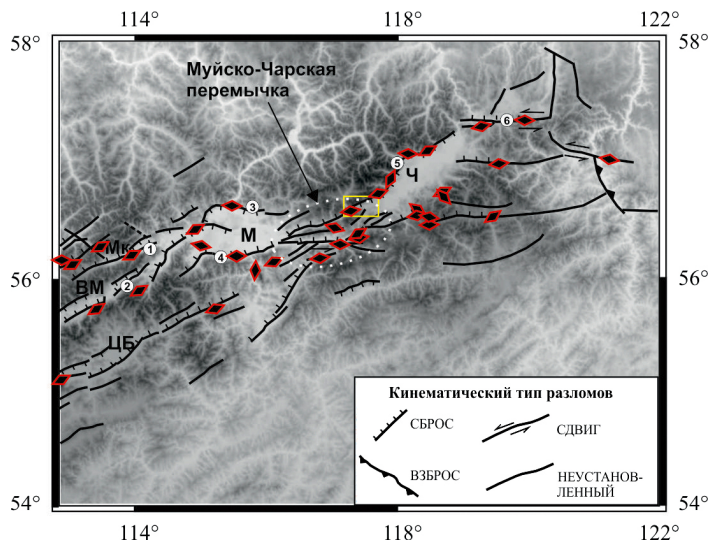


Рис. 3. Схема основных неотектонических структур северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы.

Буквами обозначены впадины: ВМ – Верхнемуйская, Мк – Муяканская, ЦБ – Цыпа-Баунтовская, М – Муйская, Ч – Чарская. Цифрами обозначены разломы кайнозойской активизации: 1 – Муяканский, 2 – Верхнемуйский, 3 – Северо-Муйский, 4 – Южно-Муйский, 5 – Кодарский, 6 – Ханьский. Ромбами обозначены палеосейсмодислокации по [Chipizubov et al., 2010].

Fig. 3. Schematic map of the main neotectonic structures in the NE flank of the Baikal rift system.

Depressions: ВМ – Upper Muya, Мк – Muyakan, ЦБ – Tsyba-Bauntov, М – Muya, Ч – Chara. Faults activated in the Cenozoic: 1 – Muyakan, 2 – Upper Muya, 3 – North Muya, 4 – South Muya, 5 – Kodar, 6 – Khaniy. Paleoseismodislocations are marked by diamonds (after [Chipizubov et al., 2010]).

активность которых относится к архею и началу палеозоя (Становая и Северо-Западная системы).

В современном рельефе разломы неотектонической активизации выражены главным образом в виде уступов, а также рвов и трещин растяжения. По кинематическим типам они делятся на сбросы (наиболее распространенные), сдвиги и взбросы. Амплитуды вертикальных смещений для сбросов варьируются в зависимости от ранга разлома. Разломы, контролирующие борт Чарской впадины, характеризуются амплитудами, превышающими 1000–1500 м. С учетом более чем километровых мощностей осадков, установленных по данным бурения и глубинного сейсмического зондирования [Enikeev, 2008], полная амплитуда вертикальных смещений по этим разломам может превышать 2500–3000 м.

Зоны разломов первого порядка имеют сложное строение. Часто они представляют ступенчатую структуру, осложненную диагональными и поперечными разрывами. В коренных обнажениях они

выражены зонами повышенной трещиноватости, дробления и дезинтеграции пород, вплоть до тектонической муки. В пределах отрезка железной дороги на южном склоне хребта Кодар выделены разломы, хорошо выраженные в рельефе системой тектонических уступов. С ними связаны относительно недавние (после последнего ледникового периода) сейсмотектонические преобразования, обусловившие существенную перестройку геоморфологического и гидрографического облика склона. В частности, отдельные водотоки, впадающие в оз. Большое Леприндо в зоне транзита, имеют каньонообразные долины, первоначально представлявшие собой зоны сейсмотектонических нарушений, разработанные затем речной эрозией. Эти трещины образовались в результате смещения крупного оползня-блока треугольной формы висячем крыле разлома, который ограничен диагональными по отношению к Байкальской системе разломами (рис. 4 и 5), обрамляющими с севера эмбриональную впадину, заполненную водами озера.

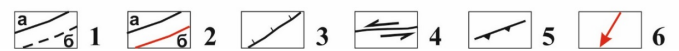
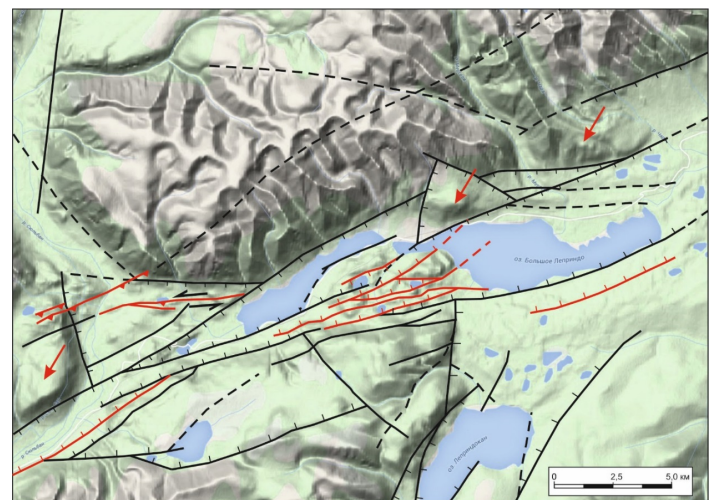


Рис. 4. Схема разломов неотектонической активизации юго-западной части Чарской впадины.

1 – разломы: а – установленные, б – предполагаемые; 2 – возрастные генерации разломов: а – разломы с признаками плиоцен-четвертичной активизации, б – разломы с признаками голоценовой активизации; 3–5 – кинематические типы разломов: 3 – сбросы, 4 – сдвиги, 5 – взбросы; 6 – сейсмогравитационные оползни-блоки.

Fig. 4. Schematic fault map of the SW segment of the Chara depression.

1 – faults: а – confirmed, б – assumed; 2 – fault groups by age: а – faults with the indicators of Pliocene-Quaternary activation, б – faults with the indicators of Holocene activation; 3–5 – fault groups by kinematics: 3 – normal, 4 – strike-slip, 5 – reverse; 6 – seismogravitational landslide blocks.

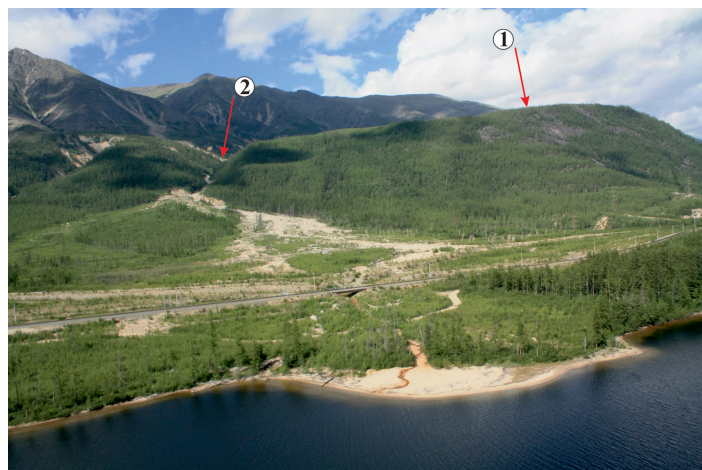


Рис. 5. Сейсмогравитационный оползень-блок в северном борту Чарской впадины. Стрелками показаны: 1 – вершина оползня-блока, запрокинутого в сторону склона, и 2 – место отрыва. По его бортам, по разломам, сформировались русла двух постоянно текущих водотоков, бассейны которых в 2001 г. стали местом формирования и схода катастрофических селей.

Fig. 5. Seismogravitational landsliding block in the northern side of the Chara depression. Arrows: 1 – top of the landslide block upturned towards the slope; 2 – place of separation. The channels of two constantly flowing water streams developed along the faults on the sides of this block. The catastrophic debris flows of 2001 were generated in these channels.

Вполне вероятно, что смещение этого оползня-блока, как и многих других, расположенных на южном склоне хр. Кодар, имеет сейсмогравитационный генезис, что связано с одним из сильнейших землетрясений послеледниковой эпохи. По бортам оползня-блока разломами были вскрыты подземные воды, изливающиеся постоянно, о чем свидетельствует наличие наледей. Бассейны этих ручьев в 2001 г. стали местом формирования и схода катастрофических селей, достигших железной дороги.

Стоит отметить, что именно Байкальская система разломов формирует малые тектонические эмбриональные впадины. Некоторые из них заполнены водой, как это произошло при образовании озер Большое и Малое Леприндо. О тектонической природе озер говорит как их достаточно большая глубина, так и положение в днище рифтовой впадины. Их формирование вследствие экзарационной деятельности ледников маловероятно, так как максимальная глубина Большого Леприндо достигает 65 м, а Малого – около 90 м.

Субширотные разломы также выражены сбросовыми уступами и кинематически сопряжены с разломами Байкальской системы. Согласно работе

[Logachev, 1984], эти структуры имеют левостороннюю сдвиговую компоненту смещений. В пределах изучаемой площади такой сдвиг установлен по левому борту долины р. Сюльбан. Кинематика сдвига устанавливается по левостороннему смещению долины небольшого ручья, также имевшего отношение к формированию долины по древнему разлому.

Особое место в кинематическом ряду разломов исследуемой территории занимают взбросы, существование которых установлено по результатам исследований В.М. Демьяновича [Solonenko, 1985]. Им описаны разрывы Сюльбанской палеосейсмодислокации, пересекающие одноименную долину и образующие обратные генеральному склону уступы высотой до 8 м (см. рис. 4). Надвиги четвертичного возраста описаны также в Верхнесюльбанской впадине В.В. Ружичем [Ruzhich, 1978].

Наряду с упомянутыми достаточно редко встречающимися взбросами и сдвигами, в районе присутствует большая группа разрывов, имеющих признаки активизации в голоцене. Это сбросы, выраженные уступами и трещинами отрыва в ледниковых отложениях и послеледниковых конусах выноса, расположенные в тыльной части оползня-блока (рис. 6). Именно по трещинам отрыва и сформировались верхние части русел селеопасных ручьев. Такие же разрывы распространены в долине р. Сюльбан, а также на перемычке между впадинами озер Большое и Малое Леприндо. Голоценовая активизация присуща главным образом разломам Байкальской, реже – Становой системы. Сейсмогенный характер структур подчеркивается кру-



Рис. 6. Сбросовый уступ по левому борту долины р. Сюльбан с признаками голоценовой активизации (26 июля 2015 г.).

Fig. 6. Normal-fault scarp on the left side of the Syulban River valley with the indicators of activation in the Holocene (July 26, 2015).

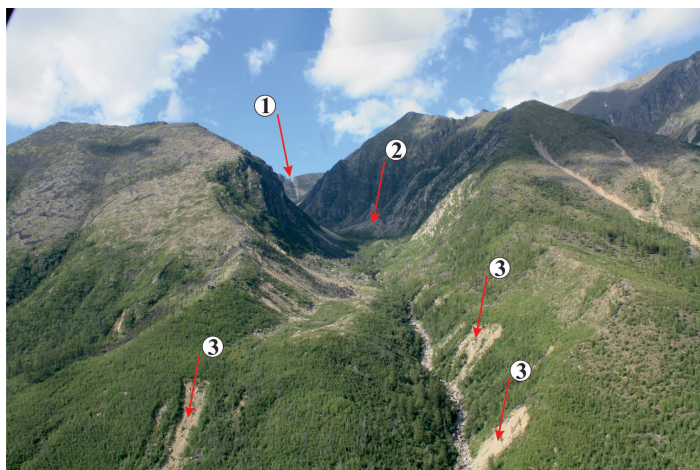


Рис. 7. Древний сквозной разлом через вершину хр. Кодар, по которому заложена долина селеопасного ручья, впадающего на северо-восточной оконечности в оз. Малое Леприндо (показан стрелкой 1). Другими стрелками показаны селеформирующие процессы – осыпи (2) и оползни-сплывы (3).

Fig. 7. Ancient fault breaking through the mountain in the Kodar ridge. A debris flow hazard water stream channel developed along this fault. The stream flows into the NE termination of the Maloe Leprindo lake (arrow 1). Mudflow-generating talus (2) and landslide and debris flows (3) are marked by arrows.

тыми склонами уступов, разрывами в современном почвенном покрове. С большой долей вероятности эти разломы имеют свое продолжение под водной линзой озера Большое Леприндо, что свидетельствует об активном погружении впадины озера в голоцене и, возможно, в настоящее время.

Согласно вышесказанному, в настоящее время тектоническая жизнь рассматриваемого района продолжает оставаться активной. Здесь по-прежнему происходят интенсивные блоковые движения, сопровождающиеся деформациями. Система активизированных разломов, развитая в южных предгорьях хребта Кодар, отчетливо выражена в рельефе в виде крупных и протяженных морфологических уступов и линейных седловин, приуроченных к приводораздельной части хребта, узких зон трещиноватости в кристаллических породах (рис. 7, 8).

Сложное тектоническое развитие горного сооружения Кодар сопровождалось формированием мощных зон дробления коренных пород, образованием тектонических трещин и разломов различного типа. В зонах крупных тектонических нарушений широко распространены грубо рассланцованные породы – тектониты, милониты, катаклазиты и брекчии, которые, быстро разрушаясь, образуют

осыпи щебнисто-мелкоглыбового материала, легко транспортируемого склоновыми потоками. Кроме того, благодаря интенсивному тектоническому дроблению, облегчаются процессы выветривания коренных пород, которые создают вдоль склонов гор многокилометровые скопления рыхлообломочного материала различных фракций – от мелких глинистых и песчаных частиц до обломков и глыб метровых размеров. Тектонические трещины и разломы различного характера способствуют возникновению гравитационных процессов и форм – обвалов, оползней, осыпей, оползней-сплывов, благодаря которым в тальвегах временных и постоянных водотоков создаются запасы грубообломочного материала, формирующего твердую фазу селевых потоков.

Тектонические разломы обусловили и специфическое строение речной сети. С ними связано формирование неравномерных ступенчатых профилей речных долин, которые определяют чередование глубинной и боковой эрозии, а при маломощных селях и водных паводках – аккумуляцию валунно-галечного материала на расширенных и относительно пологих отрезках долин.

В районе исследований речная сеть заложена по разломам или ослабленным зонам и имеет специфический облик – ярко выраженное чередование параллельных, крутопадающих и пологих участков тальвегов рек и отвесно падающих бортов долин-каньонов. Например, относительно молодые (активизированные после оледенения) зоны разломов сбросового типа придали водотокам (см. рис. 2)



Рис. 8. Характерное русло для средней части долин временных водотоков, заложенных в коренных породах по зонам разломов. Фото А.А. Гадалова.

Fig. 8. A typical channel for the middle portion of a temporary water stream valley in bedrocks along a fault zone. Photo by A.A. Gadalov.



Рис. 9. Эрозионно-аккумулятивно-селевые формы рельефа, развивающиеся на южных склонах хр. Кодар.

Fig. 9. Relief forms created by erosion, accumulation and debris flows on the southern slopes of the Kodar ridge.

предельно высокие продольные, но ступенчатые уклоны, которые на выровненных участках в определенной мере погашают скорость потоков. Речные долины, полностью или частично заложенные в зонах этих разломов, отличаются малой шириной при исключительно большой глубине, благодаря чему склоны долин крутые, часто отвесные (рис. 8). Осыпи и особенно оползни-сплывы, широко развитые на склонах таких долин, а также большая скорость добегаания ливневых и талых вод способствуют селеобразованию, занимающему ведущее место в процессе денудации (рис. 9).

Важнейшей особенностью тектонического развития рассматриваемой территории является интенсификация разнонаправленных движений в современную эпоху. При этом происходит опускание Чарской впадины и воздымание обрамляющих ее хребтов Удокан и Кодар. О воздымании хр. Кодар свидетельствуют русла ручьев, врезаемые в коренные породы и ледниковые отложения в верхней и

средней части селеопасных бассейнов на глубину 5–7 м.

В целом, неотектоническое развитие Станового нагорья создало в прошлом благоприятную обстановку для формирования и широкого распространения селей и определило прогрессирующую направленность условий селеобразования в настоящее время. Именно контрастность восходящих и нисходящих неотектонических и современных движений определила и продолжает определять не только структуру рельефа Станового нагорья, но и направленность развития экзогеодинамических процессов, особенно ярко выраженных в пределах хр. Кодар селевыми потоками, по отложениям которых проходит участок железной дороги БАМ.

4. СЕЙСМИЧЕСКИЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ СЕЛЕЙ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧАРСКОЙ ВПАДИНЫ И ХРЕБТА КОДАР

Одним из главнейших эндогенных факторов селеобразования в пределах рассматриваемой территории является высокая степень сейсмической активности Станового нагорья. Сосредоточение здесь эпицентров сильных современных землетрясений и наличие многочисленных следов катастрофических землетрясений послеледниковья позволяют отнести этот регион к одной из наиболее сейсмоактивных областей Монголо-Байкальского сейсмического пояса [Solonenko, 1966].

4.1. СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

В настоящее время юго-западная часть Чарской впадины характеризуется умеренной сейсмичностью. За период инструментальной регистрации (с 1950 г.) здесь произошло более 2700 событий с энергетическим классом (К) от 5 до 15.5 (таблица, рис. 10). Угол наклона графика повторяемости (рис. 11) равен 0.39, из чего период повторяемости землетрясений с классом $K=13$ для данного района

Распределение землетрясений юго-западной части Чарской впадины по энергетическим классам (по данным БФ ФИЦ ЕГС РАН)

Earthquake pattern in the SW segment of the Chara depression by energy classes (according to the data from the Baikal Branch of the Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS')

К	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N	604	1380	457	208	90	23	8	1	3	1	1
T, лет					1	2	4	11	27	65	160

П р и м е ч а н и е. К – энергетический класс, N – количество событий, T – время подготовки землетрясений данного класса.

N o t e. K – energy class, N – number of events, T – time of preparation for an earthquake of the given class.

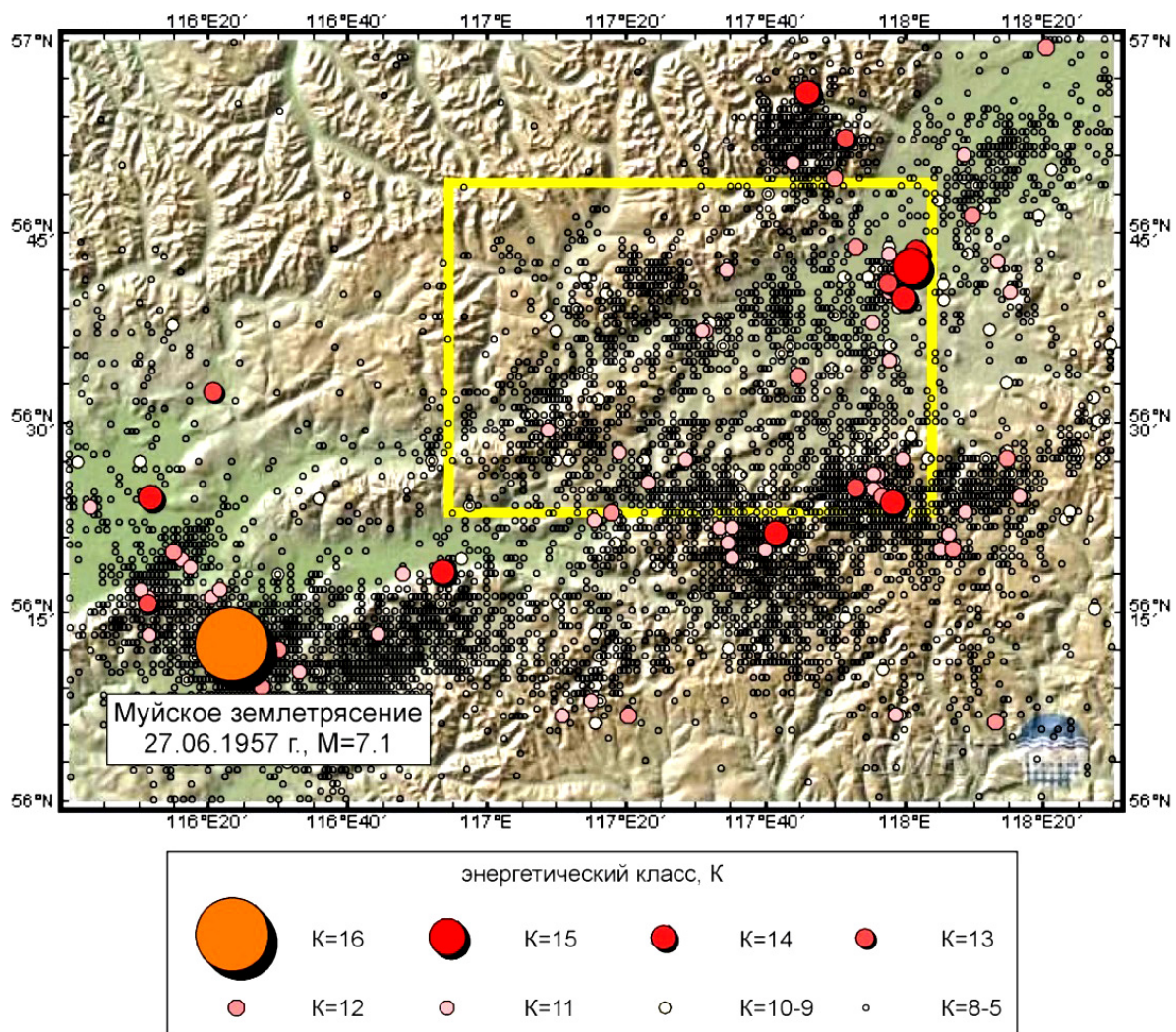


Рис. 10. Сейсмичность юго-западной части Чарской впадины и окружающих территорий за период 1957–2015 гг. (по данным БФ ФИЦ ЕГС РАН). Желтым прямоугольником выделен исследуемый регион.

Fig. 10. Seismicity in the SW segment of the Chara depression and the neighbouring territories from 1957 to 2015 (according to the data from the Baikal Branch of the Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS'). The study area is marked by the yellow box.

оценивается в 30 лет, K=14 – в 60–70 лет и K=15 – в 160 лет.

Характер реализации сейсмических событий в исследуемом районе и его окрестностях относится к смешанному типу – здесь реализуются как отдельные землетрясения, так и рои землетрясений (например, Удоканский рой 1972 г.) и афтершоковые последовательности, сопровождающие сильные землетрясения (см. рис. 10) [Golenetsky, 1981; Zhrebtsov, 2012]. Глубины землетрясений варьируются в пределах от 5 до 35 км с максимумом в диапазоне 15–25 км [Gileva et al., 2000].

Эпицентры землетрясений группируются в кластеры и широкие полосы северо-восточной ориентации в Чарской впадине и в районе Муйско-Чарской междувпадинной перемычки и в полосы севе-

ро-западной и субширотной ориентации в районе хребта Удокан (см. рис. 10). Сопоставление выделенных областей с тектоникой района говорит о приуроченности сейсмических событий к активным разломам (см. рис. 3). К этому же выводу приводит сопоставительный анализ элементов залегания реализованных плоскостей в очагах землетрясений и активных разломов. Механизмы очагов исследуемой территории показывают преобладание типичных «рифтовых» механизмов – нодальные плоскости ориентированы на северо-восток согласно основным тектоническим нарушениям, ось сжатия близвертикальна (средний азимут 214°, угол погружения от горизонта 81°), оси растяжения близгоризонтальны и имеют северо-западную ориентацию (средний азимут 323°, угол погружения к

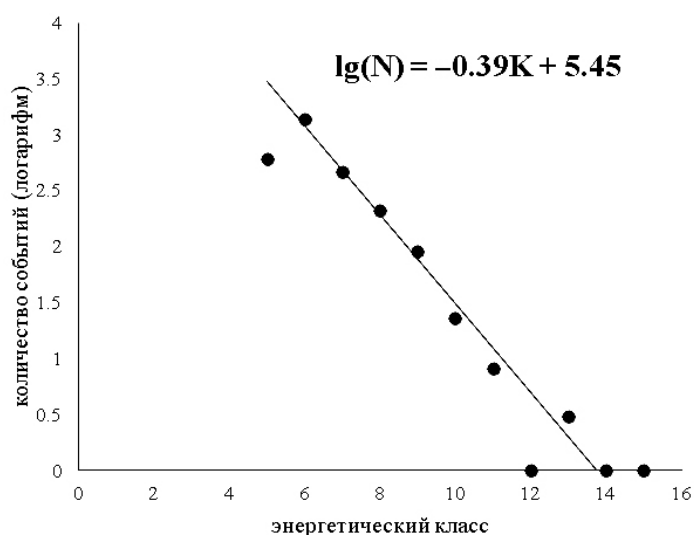


Рис. 11. График повторяемости землетрясений юго-западной части Чарской впадины.

Fig. 11. Earthquake frequency curve for the SW segment of the Chary depression.

горизонту 3°) (рис. 12). Для определения наиболее вероятных плоскостей разрывов в очагах землетрясений, локализованных в пределах Чарской впадины (рис. 12, группа А) и поднятия хр. Удокан (рис. 12, группа Б), в работе [San'kov, Dobrynina, 2015] использован метод катакластического анализа [Rebetsky, 2007]. По результатам расчетов видно, что в очагах землетрясений в Чарской впадине преобладают разрывы субширотного, северо-восточного и субмеридионального направления с достаточно крутыми углами падения. Для Удоканского поднятия характерны более пологие разрывы в очагах преимущественно субширотной и северо-восточной ориентации (рис. 12). Полученные характеристики разрывов на уровне очагового слоя удовлетворительно согласуются с разломами, закартированными на поверхности (см. рис. 3).

На основании экстраполяции графика повторяемости землетрясений различного энергетического класса в сторону сильных землетрясений следует отметить возможность ожидания в среднем в течение 1000 лет на рассматриваемой территории 126 землетрясений с энергетическим классом $K=14$ (интенсивность сотрясений примерно 8 баллов), 48 землетрясений с $K=15$ (~9 баллов), 17 землетрясений с $K=16$ (~10 баллов) и 6 землетрясений с $K=17$ (~11 баллов). Подобная высокая сейсмичность неизбежно сказывается на ряде геодинамических процессов, в том числе на формировании потенциальных запасов твердой фазы селевых потоков за счет сейсмогенных обвалов, осыпей, оползней и оползней-сплывов.

В ряде работ [Florensov, 1960; Solonenko, 1963, Laperdin, Trzhtinsky, 1982; Laperdin, Kachura, 2010; Laperdin et al., 2011] отмечено, что движение дисперсных образований, особенно на крутых склонах, в процессе их увлажнения дождевыми и талыми водами может начаться и при сравнительно слабых землетрясениях – 4–5 баллов. С учетом большой частоты слабых землетрясений в пределах данной территории, а также высокой нормы атмосферных осадков явление оползания рыхлых склоновых отложений имеет широкое распространение и играет важную роль в формировании твердой фазы селевых потоков. Так, в долинах селеопасных бассейнов наблюдаются хорошо выраженные обрушения делювиальных накоплений (см. рис. 7). Частые, хотя и слабые, подземные толчки приводят к расслаблению внутренних связей бровок в горных массивах и к их обрушению, осыпанию или оползанию, создавая тем самым потенциальные запасы твердой фазы селевых потоков в руслах временных и в прирусловой зоне постоянных водотоков.

Катастрофические землетрясения, как правило, сопровождаются значительными нарушениями горных склонов, которые проявляются в виде крупных сейсмоструктурных трещин, трещин оседания, обвалов, оползней. Наиболее мощные остаточные деформации локализуются в эпицентральных зонах катастрофических землетрясений.

В качестве примера высокого сейсмического потенциала Станового нагорья можно привести некоторые данные о сильных землетрясениях, произошедших за последние 65 лет (см. рис. 10). Так, 27 июня 1957 г. было зафиксировано 10-балльное Муйское землетрясение, эпицентральная зона которого располагалась в небольшой Намаракитской межгорной впадине эмбрионального типа вблизи юго-западной окраины Кодарского хребта. Землетрясение ощущалось на площади в 1 млн км². Подземные толчки в 7 баллов были отмечены на расстоянии более 500 км (г. Чита). При движении земной коры практически мгновенно образовались трещины сжатия и растяжения, сбросы и взбросы, разнонаправленные сдвиги, складки кручения и вихревые структуры. Крупные горные обвалы происходили на расстоянии 220–230 км от эпицентра. В результате Муйского землетрясения соседний с Кодаром хребет Удокан поднялся в среднем на 1.0–1.5 м и сдвинулся к северо-востоку на 1.0–1.2 м. Днище Намаракитской впадины опустилось на 1.5 м [Solonenko, 1966; Ruzhich et al., 1982].

Во время Нюкжинского (5 января 1958 г., магнитуда $M=6.5$, энергетический класс $K=15.1$) и Олекминского (14 сентября 1958 г., $M=6.4$, $K=15.0$) землетрясений, эпицентры которых располагались вблизи северо-восточной части хребта, площади ощутимых сотрясений составили соответственно

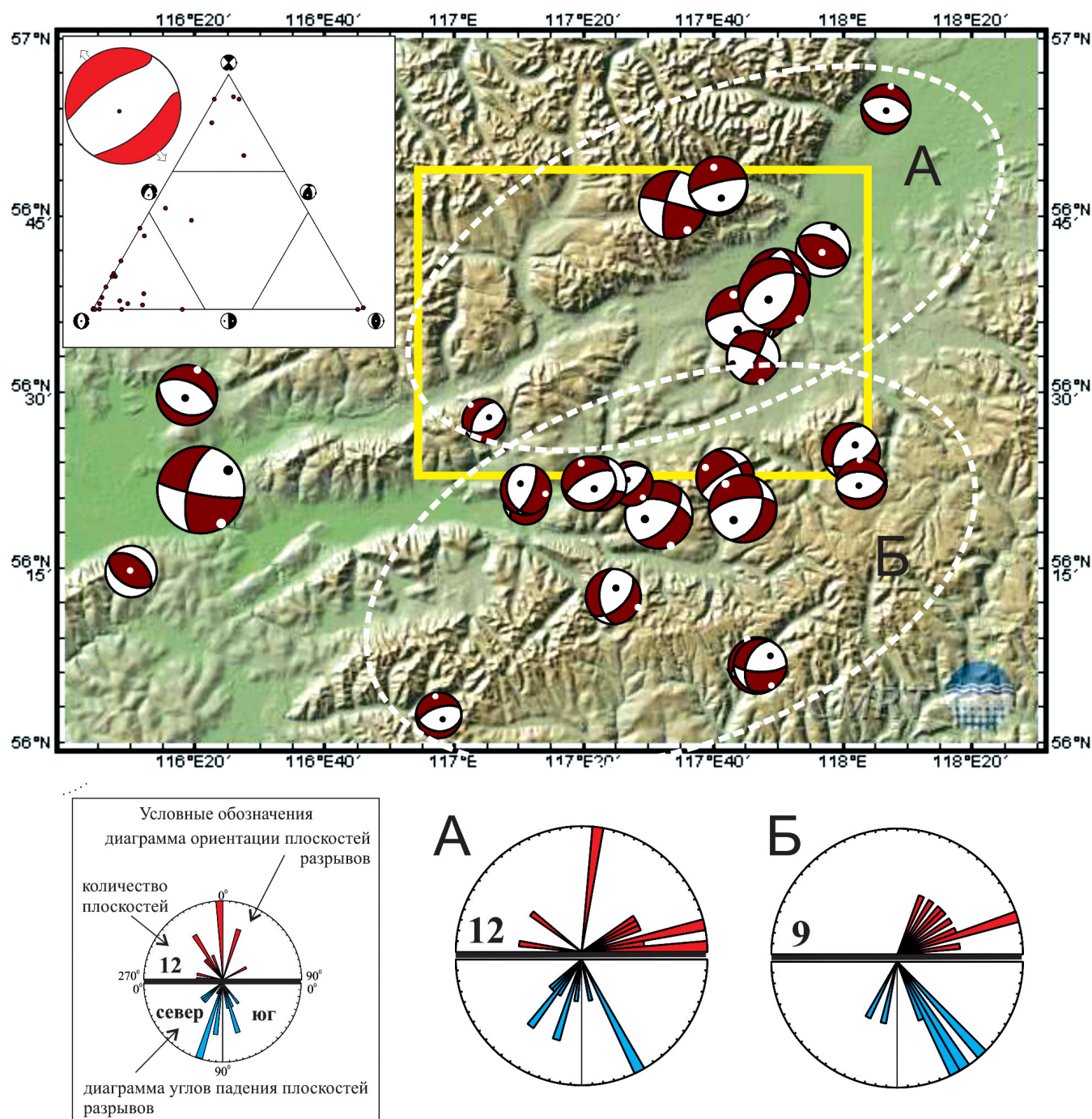


Рис. 12. Механизмы очагов землетрясений исследуемого региона по данным [Doser, 1991; Solonenko et al., 1993; Melnikova, Radziminovich, 1998; Melnikova et al., 2004, 2005, 2010; Ulomov, 1993; Radziminovich et al., 2011]. На врезке – классификационная диаграмма, показывающая соотношение фокальных механизмов с разным типом подвижки в очаге (внизу), и средний механизм (слева вверху). Желтым прямоугольником выделен исследуемый регион, белыми эллипсами показаны области, для которых определялись наиболее вероятные плоскости разрывов в очагах землетрясений, а внизу под рисунком – соответствующие им диаграммы ориентации (верхняя часть) и углов наклона (нижняя часть, падение в северных румбах – слева, в южных – справа) реализованных разрывов в очагах землетрясений юго-западной части Чарской впадины и ее окружения.

Fig. 12. Focal mechanisms of earthquakes that occurred in the study area (after [Doser, 1991; Solonenko et al., 1993; Melnikova, Radziminovich, 1998; Melnikova et al., 2004, 2005, 2010; Ulomov, 1993; Radziminovich et al., 2011]). The diagram in the insert shows the relations between the focal mechanisms and different types of displacements in the source (bottom), and the average mechanism (top left). The study region is marked by the yellow box. White ellipsoids mark the zones for which the most probable planes of discontinuities in the earthquake foci were determined. Under the figure: the corresponding diagrams of orientations (upper part) and tilt angles (lower part; dip in points of the compass: left – N, right – S) of the actual fractures in the earthquakes focal areas in the SW segment of the Chara depression and the neighbouring territories.

500 и 900 тыс. км². Рассматриваемая территория была подвержена толчкам от 4–5 до 8 баллов, в результате которых также произошли обвалы горных пород и оползни [Solonenko, 1977].

Повторяющиеся сейсмические толчки на отдельных участках часто провоцируют возникновение неожиданных, на первый взгляд, явлений. Так, в 1967 г. во время сейсмических наблюдений в районе оз. Большое Леприндо (Чаро-Муйская перемычка) сотрудниками Института земной коры АН СССР с участием одного из авторов данной работы было зарегистрировано 85 землетрясений, из них один толчок достигал ~7 баллов. Сотрясения мерзлых высокольдистых грунтов спровоцировали на склоне развитие термокарстового лога длиной 650 м, шириной 10–15 м и глубиной до 6 м. Одновременно с просадкой на бортах лога произошли солифлюкционные оползни-сплывы [Laperdin, Kachura, 2010]. Во время строительства этого участка БАМ лог был засыпан.

4.2. ПАЛЕОСЕЙСМИЧНОСТЬ

О высокой сейсмичности Станового нагорья свидетельствует серия палеосейсмогенных структур, зафиксированных в пределах Кодаро-Удоканской зоны. В непосредственной близости от района исследований располагаются несколько известных палеосейсмодислокаций – Баронка, Довачан, Сюльбанская, Верхнесауканская [Chipizubov et al., 2010]. Интенсивность сотрясений, вызванных палеоземлетрясениями, могла достигать 9–10 баллов (см. рис. 3).

В хребте Удокан на расстоянии около 160 км имеются сейсмоструктуры, связанные, по мнению В.П. Солоненко [Solonenko, 1977], с одним из сильнейших исторически зафиксированных землетрясений – Великим Восточно-Сибирским землетрясением 1 февраля 1725 г. с магнитудой 8.2 [Kondorskaya, Shebalin, 1977]. Масштаб дислокаций – их протяженность и амплитуды смещения – соответствует событию такой магнитуды. Вместе с тем отнесение их к указанному землетрясению оказалось неоднозначным. Так, при исследованиях Таксиминской сейсмодислокации (Муйская впадина) с использованием дендрохронологического метода В.В. Ружич с соавторами [Ruzhich et al., 1982] обнаружили свидетельства резких изменений нарастания годовых колец деревьев на рубеже 1725 г. Это дало основание связать сейсмодислокации в районе п. Таксимо с описываемым землетрясением. Более того, авторы работы [Radziminovich, Nikonov, 2014] интерпретировали считавшиеся удаленными эффекты землетрясения (растрескивание земли, взламывание льда на реках и озерах в 1100 км от эпицентра в районе г. Читы) как эффекты от локального землетрясения

в Восточном Забайкалье с магнитудой 6.0. Однако само существование вблизи района исследований Чина-Вакатской дислокации, голоценовый возраст которой никем не оспаривается, подтверждает его высокий сейсмический потенциал.

Таким образом, район исследований характеризуется высокой сейсмической активностью в разрезе голоценового и современного этапов развития. Уровень сотрясаемости территории весьма высок, что позволяет рассматривать сейсмичность как потенциально важный фактор накопления твердой фазы селей.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное нами исследование позволяет рассматривать позднекайнозойскую геодинамику, разломообразование и сейсмичность в качестве важнейших факторов формирования условий для селеобразования на южных склонах хребта Кодар. Исследованная территория находится на юго-западном окончании Чарской впадины северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы в районе ее сочленения с Муйско-Чарской междувпадинной перемычкой. Геодинамические условия рельефообразования территории определяются активным растяжением земной коры, поднятием плеч рифта с формированием высокогорного рельефа и больших градиентов высот. Здесь отмечается участок сужения зоны динамического влияния северо-восточного фланга Байкальской рифтовой системы, который характеризуется повышенной плотностью активизированных в позднем кайнозое разломов, а также их сегментов, активных в голоцене, определяемых как палеосейсмодислокации. Высокая концентрация активизированных разломов обусловлена концентрацией в узкой зоне деформаций, связанных с относительным дивергентным движением Сибирского блока Северо-Евразийской литосферной плиты и Забайкальского блока Амурской литосферной плиты.

Наличие нескольких систем разломов, в том числе активизированных в позднем кайнозое, определило широкое развитие зон повышенной трещиноватости, дробления и дезинтеграции пород, благодаря чему здесь более активно протекают процессы физического выветривания. Роль отдельных сейсмогенных структур в процессе формирования селевых потоков зависит от их местоположения относительно селевых бассейнов и русел.

Современная и палеосейсмичность Чарской впадины и окружающих ее поднятий определяются дифференцированными движениями по активизированным разломам. Эпицентры землетрясений и палеосейсмодислокации вытянуты вдоль активных

разломов, являющихся одновременно границами поднятых и опущенных блоков земной коры. Высокий уровень и частота сотрясаемости территории на современном и голоценовом этапах приводят к интенсивному гравитационному перемещению рыхлого материала с формированием его запасов в отрицательных формах рельефа и у подножий склонов. В эпицентральных зонах катастрофических землетрясений только за счет сейсмогенного дробления кристаллических пород и интенсификации процессов физического выветривания формируются мощные запасы рыхлообломочного материала, являющиеся важным источником твердой фазы селевых потоков [Florensov, 1960; Solonenko, 1963; Solonenko et al., 1969, Laperdin et al., 2011].

Территория Станового нагорья как составная часть Монголо-Байкальского сейсмического пояса в настоящее время переживает период активизации сейсмической деятельности, в связи с чем роль

сейсмотектонического фактора в создании условий для селеобразования повышается. Сейсмотектонические процессы создали и продолжают активно создавать общие фоновые и прямые предпосылки селеформирования в результате повышения базиса эрозии, а также вследствие многочисленных землетрясений, определяющих формирование очагов накопления твердой составляющей селей.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны д.г.-м.н. Е.А. Рогожину и анонимным рецензентам за поддержку исследования и критические замечания, направленные на улучшение качества статьи. Часть работы, связанная с геодинамическими исследованиями, выполняется при поддержке РФФИ (проект № 17-05-00826_a).

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Chipizubov A.V., Smekalin O.P., Semenov R.M., Imaev V.S., 2010. Paleoseismicity of the Pribaikalie. *Seismic Instruments* 46 (2), 136–151. <https://doi.org/10.3103/S0747923910020040>.
- Doser D., 1991. Faulting within the eastern Baikal rift as characterized by earthquake studies. *Tectonophysics* 196 (1–2), 109–139. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90292-Z](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90292-Z).
- Enikeev F.I., 2008. The Late Cenozoic of northern Transbaikalia and paleoclimates of Southern East Siberia. *Russian Geology and Geophysics* 49 (8), 602–610. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.013>.
- Florensov N.A., 1960. Mesozoic and Cenozoic Depressions of Pribaikalie. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow–Leningrad, 257 p. (in Russian) [Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 257 с.].
- Gileva N.A., Melnikova V.I., Radziminovich N.A., Déverchère J., 2000. Location of earthquakes and average velocity parameters of the crust in some areas of the Baikal region. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 41 (5), 609–615.
- Golenetsky S.I., 1981. Analysis of the epicentral field and quantitative estimates of seismicity. In: V.P. Solonenko (Ed.), *Seismogeology and detailed seismic zoning of Pribaikalie*. Nauka, Novosibirsk, p. 19–46 (in Russian) [Голенецкий С.И. Анализ эпицентрального поля и количественные оценки сейсмичности // Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1981. С. 19–46].
- Kondorskaya N.V., Shebalin N.V. (Eds.), 1977. New Catalog of Strong Earthquakes in the U.S.S.R. from Ancient Times Through 1975. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 536 с.].
- Laperdin V.K., Imaev V.S., Verkhosin I.I., Kachura R.A., Imaeva L.P., 2011. Hazardous Geological Processes in the South of Yakutia and Adjacent Territories. Institute of the Earth's Crust of SB RAS, Irkutsk, 240 p. (in Russian) [ЛAPERДИН В.К., ИМАЕВ В.С., ВЕРХОЗИН И.И., КАЧУРА Р.А., ИМАЕВА Л.П. Опасные геологические процессы на юге Якутии и сопредельных территориях. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. 240 с.].
- Laperdin V.K., Kachura R.A., 2010. Geodynamics of Hazardous Processes in Zones of Natural and Technogenic Complexes in East Siberia. Institute of the Earth's Crust of SB RAS, Irkutsk, 312 p. (in Russian) [ЛAPERДИН В.К., КАЧУРА Р.А. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2010. 312 с.].
- Laperdin V.K., Trzhtsin'sky Yu.B., 1982. Seismic events in the Baikal rift zone. In: *Proceedings of the 4th International Engineering Geology Congress*. India, p. 69–75 (in Russian) [ЛAPERДИН В.К., ТРЖЦИНСКИЙ Ю.Б. Сейсмогенные явления Байкальской рифтовой зоны // Труды 4-го Международного инженерно-геологического конгресса. Индия, 1982. С. 69–75].
- Logachev N.A. (Ed.), 1984. *Geology and Seismicity of the BAM Zone. Neotectonics*. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, 207 p. (in Russian) [Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск: Наука. СО, 1984. 207 с.].

- Logatchev N.A., 1993. History and geodynamics of the Lake Baikal rift in the context of the Eastern Siberia rift system: a review. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf Aquitaine* 17 (2), 353–370.
- Melnikova V.I., Radziminovich N.A., 1998. Mechanisms of action of earthquake foci in the Baikal region over the period 1991–1996. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 39 (11), 1598–1607.
- Melnikova V.I., Radziminovich N.A., Tatomir N.V., 2004. Pribaikalie and Transbaikalia. V. Catalogs of Earthquake Focal Mechanisms. In: Earthquakes of North Eurasia in 1998. FOP, Obninsk, Appendix: CD:\Appendix\T13_Baykal_98.xls (in Russian) [Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Татомир Н.В. Прибайкалье и Забайкалье. V. Каталоги механизмов очагов землетрясений // Землетрясения Северной Евразии в 1998 г. Обнинск: ФОР, 2004. Приложение: CD:\Appendix\T13_Baykal_98.xls].
- Melnikova V.I., Radziminovich N.A., Tatomir N.V., 2005. Pribaikalie and Transbaikalia. VII. Catalogs of Earthquake Focal Mechanisms. In: Earthquakes of North Eurasia in 1999. FOP, Obninsk, Appendix: CD:\Appendix\T13_Baykal_99.xls (in Russian) [Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Татомир Н.В. Прибайкалье и Забайкалье. VII. Каталоги механизмов очагов землетрясений // Землетрясения Северной Евразии в 1999 г. Обнинск: ФОР, 2005. Приложение: CD:\Appendix\T13_Baykal_99.xls].
- Melnikova V.I., Radziminovich N.A., Tatomir N.V., Dobrynina A.A., 2010. Pribaikalie and Transbaikalia. VII. Catalogs of Earthquake Focal Mechanisms. In: Earthquakes of North Eurasia in 2004. GS RAS, Obninsk, Appendix: CD:\Appendix_2004\T12_Baykal_2004.xls (in Russian) [Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Татомир Н.В., Добрынина А.А. Прибайкалье и Забайкалье. VII. Каталоги механизмов очагов землетрясений // Землетрясения Северной Евразии в 2004 г. Обнинск: ГС РАН, 2010. Приложение: CD:\Appendix_2004\T12_Baykal_2004.xls].
- Perov V., Chernomorets S., Budarina O., Savernyuk E., Leontyeva T., 2017. Debris flow hazards for mountain regions of Russia: regional features and key events. *Natural Hazards* 88 (Supplement 1), 199–235. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2841-3>.
- Radziminovich N.A., Melnikova V.I., Tatomir N.V., Dobrynina A.A., 2011. Pribaikalie and Transbaikalia. VII. Catalogs of Earthquake Focal Mechanisms. In: Earthquakes of North Eurasia in 2005. GS RAS, Obninsk, Appendix: CD:\Appendix_2005\T11_Baykal_2005.xls (in Russian) [Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Татомир Н.В., Добрынина А.А. Прибайкалье и Забайкалье. VII. Каталоги механизмов очагов землетрясений // Землетрясения Северной Евразии в 2005 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. Приложение: CD:\Appendix_2005\T11_Baykal_2005.xls].
- Radziminovich Y.B., Nikonov A.A., 2014. “Great East Siberian” earthquake of February 1, 1725 (M=8.2): revision of the main parameters in the light of additional data and modern requirements. *Seismic Instruments* 50 (4), 325–346. <https://doi.org/10.3103/S0747923914040045>.
- Rebetsky Yu.L., 2007. Tectonic Stresses and Strength of Mountain Ranges. Akademkniga, Moscow, 406 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.].
- Ruzhich V.V., 1978. On combinations of stresses of extensions and compression in the Baikal rift. In: N.A. Logatchev (Ed.), Tectonics and seismicity of continental rift zones. Nauka, Moscow, p. 27–32 (in Russian) [Ружич В.В. О сочетании напряжений растяжения и сжатия в Байкальском рифте // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон / Ред. Н.А. Логачев. М.: Наука, 1978. С. 27–32].
- Ruzhich V.V., 1980. Active faults in the area of the Kodar tunnel, BAM. In: M.M. Odintsov (Ed.), Seismotectonics and seismicity of BAM construction area. Nauka, Moscow, p. 77–86 (in Russian) [Ружич В.В. Активные разломы в районе Кодарского тоннеля трассы БАМ // Сейсмотектоника и сейсмичность района строительства БАМ / Ред. М.М. Одинцов. М.: Наука, 1980. С. 77–86].
- Ruzhich V.V., Sankov V.A., Dneprovsky Yu.I., 1982. Dendrochronological dating of seismogenic faults in Stanovoi Plateau. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* (8), 62–69 (in Russian) [Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И. Дендрохронологическое датирование сейсмогенных разрывов в Становом нагорье // Геология и геофизика. 1982. № 8. С. 62–69].
- San'kov V.A., Dobrynina A.A., 2015. Modern fault formation in the Earth's crust of the Baikal rift system according to the data on the mechanisms of earthquake sources. *Doklady Earth Sciences* 465 (1), 1191–1195. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15110203>.
- Solonenko A.V., Solonenko N.V., Melnikova V.I., Kozmin B.M., Kuchai O.A., Sukhanova S.S., 1993. Strains and displacements in earthquake foci of Siberia and Mongolia. In: V.I. Ulomov (Ed.), Seismicity and seismic zoning of northern Eurasia. Vol. 1. United Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, p. 113–122 (in Russian) [Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Кучай О.А., Суханова С.С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1 / Ред. В.И. Уломов. М.: ОИФЗ РАН, 1993. С. 113–122].
- Solonenko V.P., 1963. Seismic Zoning of East Siberia (Brief Explanatory Note to the Map, 1962). Irkutsk, 30 p. (in Russian) [Солоненко В.П. Сейсмическое районирование Восточной Сибири (краткая объяснительная записка к карте 1962 г.). Иркутск, 1963. 30 с.].
- Solonenko V.P. (Ed.), 1966. Living Tectonics, Volcanoes and Seismicity of the Stanovoi Highland. Nauka, Moscow, 231 p. (in Russian) [Живая тектоника, вулканы и сейсмичность Станового нагорья / Ред. В.П. Солоненко. М.: Наука, 1966. 231 с.].

- Solonenko V.P. (Ed.), 1977. Seismic Zoning of Eastern Siberia and Its Geological and Geophysical Base. Nauka, Novosibirsk, 301 p. (in Russian) [Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1977. 301 с.].*
- Solonenko V.P. (Ed.), 1985. Geology and Seismicity of the BAM Zone. Seismogeology and Seismic Zoning. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, 191 p. (in Russian) [Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука. СО, 1985. 191 с.].*
- Solonenko V.P., Kurushin R.A., Pavlov O.V., Khil'ko S.D., Khromovskikh V.S., Shmotov A.P., 1969. Modern catastrophic movements of the crust in the Mongolia-Baikal seismic region. In: Problems of modern crustal movements. Nauka, Moscow, p. 377–384 (in Russian) [Солоненко В.П., Курушин Р.А., Павлов О.В., Хилько С.Д., Хромовских В.С., Шмотов А.П. Современные катастрофические движения земной коры в Монголо-Байкальской сейсмической области // Проблемы современных движений земной коры. М.: Наука, 1969. С. 377–384].*
- Soloviev S.L. (Ed.), 1985. Geology and Seismicity of the BAM Zone. Seismicity. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, 192 p. (in Russian) [Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмичность / Ред. С.Л. Соловьев. Новосибирск: Наука. СО, 1985. 192 с.].*
- Ulomov V.I. (Ed.), 1993. Seismicity and Seismic Zoning of Northern Eurasia. Vol. 1. United Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, 298 p. (in Russian) [Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1 / Ред. В.И. Уломов. М.: ОИФЗ РАН, 1993. 298 с.].*
- Zherebtsov G.A. (Ed.), 2012. Seismoionospheric and seismoelectromagnetic processes in the Baikal Rift Zone. Publishing House of the Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, 304 p. (in Russian) [Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / Ред. Г.А. Жеребцов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 304 с.].*



Лапердин Валерий Кириллович, докт. геол.-мин. наук, с.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
✉ e-mail: laperdin@crust.irk.ru

Laperdin, Valery K., Doctor of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust of SB RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
✉ e-mail: laperdin@crust.irk.ru



Саньков Владимир Анатольевич, канд. геол.-мин. наук, зав. лабораторией
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Иркутский государственный университет, геологический факультет
664003, Иркутск, ул. Ленина, 3, Россия
Тел. (3952)427903; e-mail: sankov@crust.irk.ru

Sankov, Vladimir A., Candidate of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Irkutsk State University, Geological Faculty
3 Lenin street, Irkutsk 664003, Russia
Tel. +7(3952)427903; e-mail: sankov@crust.irk.ru



Добрынина Анна Александровна, канд. физ.-мат. наук, с.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Геологический институт СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия
e-mail: dobrynina@crust.irk.ru

Dobrynina, Anna A., Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Geological Institute, Siberian Branch of RAS
6a Sakhyanova street, Ulan-Ude 670047, Russia
e-mail: dobrynina@crust.irk.ru