

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Общая и региональная геология, петрология и вулканология

УДК 551.248(571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-2-1

Сейсмотектоническая реактивизация краевых шовных зон Сибирского кратона

Л.П. Имаева^{1, 2, *}, К.Г. Маккей³, Б.М. Козьмин⁴, А.А. Макаров⁴

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

²Академия наук Республики Саха (Якутия), Якутск, Россия

³Департамент геологических наук, Университет штата Мичиган, Восточный Лансинг, США

⁴Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

*imaeva@crust.irk.ru

Аннотация. Проведено комплексное сейсмотектоническое исследование тектонических структур Сибирской платформы и ее складчатого обрамления с целью выявления региональных закономерностей процессов деструкции земной коры и динамики формирования очаговых зон сильных землетрясений. Проанализированы данные по геолого-геофизическому строению, новейшему структурному плану, количественным характеристикам новейших и современных тектонических движений. С учетом активности и направленности геодинамических процессов разработаны региональные принципы классификации неотектонических структур с обоснованием дифференциации их на классы. Рассмотрены наиболее активные сегменты Верхоянского краевого шва и Байкало-Становой складчатой системы, которые оказывают динамическое влияние на стиль тектонических деформаций смежных участков Сибирской платформы, где расположены стратегические месторождения полезных ископаемых Республики Саха (Якутия). Установлено, что наиболее активизированные структуры Сибирской платформы расположены в зонах динамического влияния контактных краевых швов. Они контрастно выражены в градиентном поле новейших вертикальных тектонических движений, но характеризуются мозаичным расположением средних и низких значений современных скоростей. На уровень их сейсмической активизации и кинематический тип сейсмотектонических деформаций моделирующее влияние оказывают глобальные геодинамические процессы, происходящие на границах Евразийской, Североамериканской и Амурской литосферных плит. Слабо активизируемые структуры Сибирской платформы, характеризующиеся наибольшими значениями скоростей современных движений, имеют гетерогенный генезис. На динамику формирования этих высокоградиентных зон деформаций, возможно, оказали влияние гляциоизостатические движения. При оценке степени геодинамической активности новейших структур необходимо рассматривать все факторы, которые ответственны за сейсмогеодинамические процессы, включая накопление тектонических напряжений и интенсивность сейсмических событий.

Ключевые слова: Сибирская платформа, краевые швы, сейсмогенерирующие структуры, активные разломы, флюиды, позднекайнозойские деформации, механизм очага землетрясения, потенциальная сейсмичность.

Благодарности. Исследования проведены при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00062 «Динамика новейших структур континентально-шельфовой зоны северо-восточного сектора Российской Арктики»).

Введение

Геодинамические процессы, происходящие в земной коре, отличаются сложностью и зависят

от множества факторов, действие которых в разных тектонических структурах проявляется дифференцированно. Проблема сейсмотектонической

активизации структур докембрийских кратонов, которые традиционно считаются в тектоническом отношении стабильными областями, в последнее время пересматривается [1–3]. По мнению Е.В. Артюшкова с соавторами, на значительной площади континентов в плиоцен-четвертичное время произошли быстрые поднятия земной коры, не зависящие непосредственно от горизонтальных движений литосферных плит, вследствие которых повысилась сейсмичность докембрийских платформ. Авторы данной публикации связывают факт активизации тектонических структур докембрийских кратонов с поступлением в литосферу за последние несколько миллионов лет большого объема флюидов. Вследствие этого подвижность коры докембрийских кратонов возросла, что привело к ее высокоградиентным деформациям со снятием накопленных напряжений в виде сильных землетрясений. Как пример была приведена серия катастрофических землетрясений с магнитудами до 7,7, произошедших в 1811–1812 годах в сейсмической зоне Нью-Мадрид на Среднем Западе США.

Как отмечалось нами ранее, на территории Сибирского кратона инструментальными сейсмологическими наблюдениями зарегистрирован ряд эпицентров землетрясений с $M_w = 4,0–5,7$ и зафиксированы высокоградиентные зоны деформаций новейших и современных вертикальных тектонических движений [2]. Геодезическими методами здесь выявлены максимальные значения скоростей современных тектонических движений [4], а также зоны высоких значений скоростей движений за неотектонический этап развития [3, 5]. Наибольшие скорости современных движений (до 14 мм/год) фиксируются в слабоактивизированных структурах Сибирской платформы, а высокоградиентные зоны новейших деформаций – в зонах динамического влияния краевых швов Сибирского кратона. Помимо этого, на юго-западе Сибирской платформы при исследовании активных разломов Иркутского амфитеатра были обнаружены палеосейсмодислокации, которые можно сопоставить с землетрясениями предполагаемой магнитуды сейсмических событий до 6,0–6,5 [6]. На северо-восточном борту Чульманской впадины в результате сеймотектонических исследований вдоль трассы газопроводных систем «Восточная Сибирь – Тихий океан» и «Сила Сибири» были выявлены палеосейсмодислокации с потенциальной магнитудой $M_w = 7,0$ [7]. Отмеченные выше сейсмиче-

ские события, а также высокие значения геодинамических показателей активности новейших структур указывают на необходимость изучения проблемы генезиса и динамики сейсмогенерирующих процессов в очаговых зонах землетрясений активизированных структур Сибирской платформы.

Геодинамические показатели деформации геологической среды, способные вызвать экологические последствия, в первую очередь связаны с различными типом и интенсивностью проявлений напряженно-деформированного состояния земной коры, позволяющих оценить степень ее деструкции (рис. 1). Такими данными могут являться: сейсмичность; новейшие и современные тектонические движения; особенности распространения тектонической трещиноватости и сети разрывных нарушений. В статье рассматривается различный набор геодинамических показателей геологической среды для платформенных и орогенных структур, что необходимо учитывать при оценке потенциального сейсмического риска территорий, где расположены стратегические месторождения полезных ископаемых Республики Саха (Якутия).

Для решения поставленных задач нами использованы методические приемы, базирующиеся на структурно-геометрическом изучении типов сеймотектонических деформаций в эпицентральных зонах сильных землетрясений [5, 8]. Составные части этого метода – проведение детальных работ по установлению структурных парагенезисов активных разломов и типов позднекайнозойских деформаций, крупномасштабные тектонофизические, палеосейсмологические, морфотектонические и неотектонические исследования, дешифрирование дистанционных материалов и снимков лазерного сканирования. В основу исследований положен региональный материал тематических исследований авторов. Также использованы сведения по геологии, тектонике, геофизике, сейсмогеологии и других смежных дисциплин, полученные другими производственными и научно-исследовательскими организациями. Методические аспекты отдельных разделов статьи подробно рассмотрены в публикациях последних лет [8–10].

Результаты исследований

Активизация тектонических структур Сибирского кратона. Основную часть Сибирского кратона занимает платформа, образованная

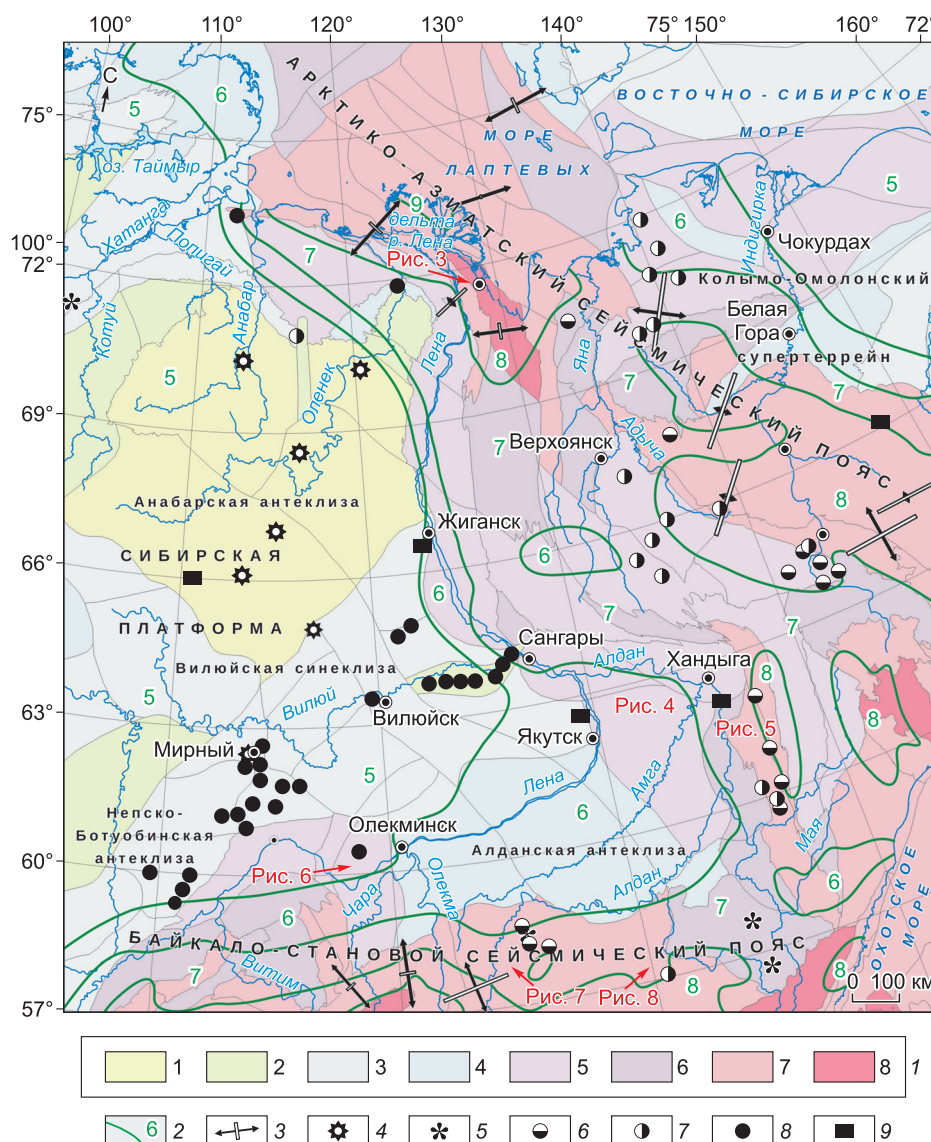


Рис. 1. Схема геодинамической активности неотектонических структур Сибирского кратона и его горно-складчатого обрамления (по [6] с изменениями).

1 – классы геодинамической активности: 1, 2 – низкой, 3–5 – умеренной, 6–8 – высокой; 2 – изолинии интенсивности сотрясений в баллах по шкале MSK-64 (по [6]); 3 – горизонтальная проекция главных осей деформаций: длина стрелок соответствует форме тензора деформаций и определенному сейсмотектоническому режиму; 4–9 – месторождения: 4 – алмазов; 5 – платиноносных россыпей; 6 – золота; 7 – цветных и редких металлов; 8 – нефти и газа; 9 – угля.

Fig. 1. Schematic map of geodynamic activity of the neotectonic structures of the Siberian Craton and its rock-folded frame (after [6] with modifications).

1 – classes of geodynamic activity: 1, 2 – low, 3–5 – moderate, 6–8 – high; 2 – intensity isolines in points on a scale MSK-64 (after [6]); 3 – horizontal projections of principal stress axes (arrow's length corresponds to strain tensor and seismotectonic regime); 4–9 – deposits: 4 – diamond; 5 – platinum-bearing placer; 6 – gold; 7 – non-ferrous and rare metals; 8 – oil and gas; 9 – coal.

сложно деформированными метаморфическими породами фундамента, которые перекрыты полого залегающими осадочными и вулканическими отложениями чехла [11, 12]. Верхоянский, Становой и Байкало-Патомский складчато-надвиговые пояса являются ее восточной и южной окраинами (рис. 2). Верхоянский складчато-на-

двиговый пояс образован мощным (до 15 км) клином деформированных пород карбона, перми, триаса и юры, которые представляют собой типичные накопления пассивной континентальной окраины [13]. Байкало-Патомский складчато-надвиговый пояс, расположенный к западу от Алданского щита, представляет собой недиффе-

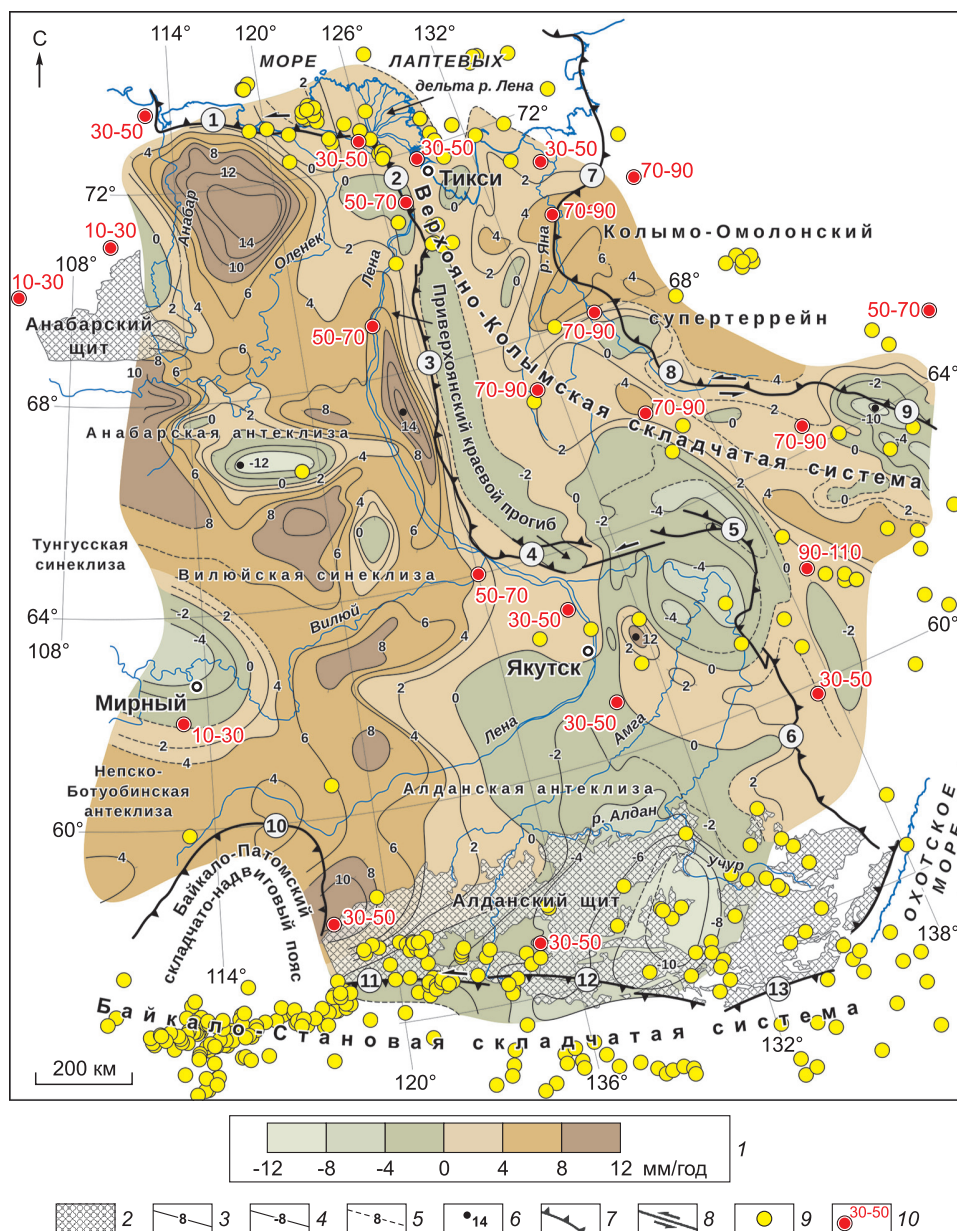


Рис. 2. Тектоническое строение Сибирского кратона (по [29] с изменениями).

Сегменты: Верхоянского краевого шва: ① – Оленекский, ② – Хараулахский, ③ – Орулганский, ④ – Куранахский, ⑤ – Бараинский, ⑥ – Южно-Верхоянский; Колымо-Полуосного краевого шва: ⑦ – Полуосно-Дебинский, ⑧ – Адыча-Тарынский, ⑨ – Улахан-Дарпир; Станового краевого шва: ⑩ – Байкало-Патомский, ⑪ – Западно-Становой, ⑫ – Центрально-Становой, ⑬ – Восточно-Становой.

1 – шкала скоростей современных вертикальных тектонических движений (мм/год); 2 – области выходов пород кристаллического фундамента на дневную поверхность; 3–5 – изолинии скоростей современных вертикальных тектонических движений (мм/год) (по [4]): 3 – положительные, 4 – отрицательные, 5 – предполагаемые; 6 – максимальные значения скоростей современных вертикальных тектонических движений (мм/год); 7, 8 – кинематика активных разломов: 7 – взбросо-надвиги, 8 – сдвиги; 9 – эпицентры землетрясений с $M_w \geq 4,1$ (по [32, 33]); 10 – значения теплового потока (mW/m^2) (по [21]).

Fig. 2. Tectonic structure of Siberian Craton (after [29] with modifications).

Segments: Verkhoyansk marginal suture: ① – Olenek, ② – Kharaulakh, ③ – Orulgan, ④ – Kuranakh, ⑤ – Barainsky, ⑥ – South Verkhoyansk; Kolyma-Polousny marginal suture: ⑦ – Polousny-Debinsky, ⑧ – Adycha-Taryn, ⑨ – Ulakhan-Darpir; Stanovoy marginal suture: ⑩ – Baikal-Patom, ⑪ – West Stanovoy, ⑫ – Central-Stanovoy, ⑬ – East Stanovoy.

1 – scale of rates of modern vertical tectonic movements (mm/yr); 2 – outcrops of crystalline basement rocks; 3–5 – isolines of rates of modern vertical tectonic movements (mm/yr) (after [4]): 3 – positive, 4 – negative, 5 – supposed; 6 – maximum velocity values; 7–8 – kinematics of active faults: 7 – thrusts, 8 – strike-slips; 9 – earthquakes epicenters with $M_w \geq 4,1$ (after [32, 33]); 10 – values of the heat current (mW/m^2) (after [21]).

ренцированную зону, сложенную ниже- и верхнеархейскими разнородными комплексами. Начиная с раннего протерозоя и все последующее время, он развивался как структура сводово-глыбового типа, испытывая перманентно поднятие, размыв и внедрение интрузий различного возраста и состава [11, 14].

Алданский щит расположен на южной окраине Сибирской платформы и сложен преимущественно глубоко измененными горными породами гранулитовой фации метаморфизма и в меньшей степени породами амфиболитовой и зеленосланцевой фаций. Здесь установлено широкое развитие глубинных надвигов, тектонических покровов и крупных сдвигов различного возраста [14]. В пределах щита выделяются крупные блоки (террейны), разделенные зонами тектонического меланжа, различающиеся по составу слагающих их метаморфических и магматических образований, характеру и степени метаморфизма, а также структурно-динамическому стилю. Шовные зоны террейнов в сейсмическом отношении активизированы и различаются различной степенью потенциальной сейсмической активности.

За новейший этап тектонического развития структуры Сибирского кратона испытали сравнительно дифференцированные поднятия, величины которых колеблются от 100 до 1500 м. Важная особенность неотектонической структуры – большая плотность линейных тектонических нарушений [11]. Границы неотектонических структур совпадают с активизированными разломами различного ранга, возраста и глубины заложения. Это указывает на то, что новейшие движения носят преимущественно блоковый характер и отражают общую тенденцию тектонического развития территории [2]. Степень геодинамической активности новейших структур Сибирского кратона (см. рис. 1) и плановое распределение элементов активизации (см. рис. 2) показывают, что наиболее высокие показатели характерны для региональных сдвиговых зон и краевых швов надвиговой природы, отделяющих Сибирскую платформу от Верхояно-Колымской и Байкало-Становой складчатых систем. Для центральных областей Сибирской платформы характерны низкие и умеренные значения показателей геодинамической активности неотектонических структур (см. рис. 1).

Обращает на себя внимание факт, что слабо активизируемые структуры платформы отличаются дифференцированным полем скоростей

современных вертикальных тектонических движений и их высокими показателями (см. рис. 2). Высокоградиентные зоны деформаций современных движений фиксируются на северном борту Анабарской антеклизы. Их плановый рисунок типичен для периферических зон гляциоизостатических поднятий других платформ. Скорость вертикальных движений в аналогичных структурах достигает десятков сантиметров в год. Это на 1–2 порядка превышает их значения вне ледниковых зон, что сопоставимо с геодезическими параметрами Анабарской антеклизы [15]. Другим фактором активизации тектонических структур докембрийских кратонов в плиоцен-четвертичное время, возможно, является поступление в литосферу за последние несколько миллионов лет большого объема флюидов [1, 16–18; и др.]. Индикаторами их воздействия на геологическую среду считаются месторождения флюидного генезиса, в том числе и кимберлиты [19].

К геодинамическим факторам активизации новейших структур платформы и реактивизации ее краевых швов помимо структурно-динамических показателей относятся и данные теплового потока (см. рис. 2). Для Сибирской платформы характерно преобладание низких значений, которые составляют в среднем 20–35 мВт/м² [20, 21]. Выше этого уровня (до 50–70 мВт/м²) значения отмечаются в области динамического влияния краевых швов, что, возможно, связано с теплогенерацией в ходе коллизионных процессов на границе литосферных плит. В пределах тектонических структур Сибирской платформы при максимальной мощности криолитозоны был зафиксирован аномально низкий тепловой поток (20–30 мВт/м²). Криолитозона такой мощности могла сформироваться только при условии существования здесь низких значений теплового потока 20–15 тыс. л. н. [22]. В аналогичных структурах платформ Америки и Африки средний геотермический тепловой поток практически одинаков и изменяется в пределах 46–54 мВт/м². Вследствие этого тепловые аномалии Сибирской платформы, возможно, являются «поверхностными» и не отражают температурные условия в глубоких слоях земной коры.

Сейсмотектонические деформации активных сегментов. В данном разделе статьи проанализированы активные сегменты Верхоянского краевого шва и Байкало-Становой складчатой системы, которые оказывают динамическое влияние на стиль тектонических деформаций смеж-

ных участков Сибирской платформы (см. рис. 2). Краевые шовные зоны Сибирского кратона пространственно сближены с главными сейсмогенерирующими структурами Верхоянской и Байкало-Становой складчатых систем и сопряжены с ними по определенному кинематическому типу. В данных зонах проявлены основные эпицентральные поля, сейсмологические параметры которых полностью отражают стиль тектонических деформаций сопряженных разломных систем (см. рис. 1, 2). Активизация краевых шовных зон оказывает динамическое воздействие на возникновение в контактных структурах Сибирской платформы проявлений местной сейсмичности.

Северный сектор Верхоянского складчато-надвигового пояса. На севере региона основная зона проявлений местной сейсмичности проходит в пределах северо-западного сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса, современный тектонический план которого обусловлен сопряжением разнонаправленных Усть-Ленской и Лено-Анабарской сдвиговых систем, контрастно отображающих зону сочленения главных геоструктур (рис. 3). Наиболее активен в сейсмическом отношении Оленекский сектор Лено-Анабарского прогиба, расположенный в градиентном поле высоких значений скоростей новейших движений, а также средних и низких значений современных скоростей (см. рис. 2). Сектор протягивается в широтном направлении вдоль побережья моря Лаптевых от устья р. Лена до Хатангского залива. К северу его структуры продолжают на шельф моря Лаптевых, где их ограничением служит полоса высокоградиентных положительных гравитационных аномалий [8, 23]. Дислокации зоны формировались по серии субширотных сбросо-левосдвиговых разломов вдоль северной окраины Сибирской платформы. На это указывают кулисная ориентировка складок, а также резкий разворот структур на фланге северного крыла и косо расположенные сбросы на западе южного крыла данной сдвиговой зоны. Тектонофизические данные показывают, что поля напряжений сектора сформировались под воздействием регионального сдвигового напряжения запад-северо-западной ориентировки [6, 23]. Основной сдвиг, возможно, проходит севернее, в пределах шельфа моря Лаптевых, где морскими сейсморазведочными работами были обнаружены деформации домелового (акустического) фундамента [24]. Расположенный южнее Лено-Анабарский крае-

вой шов прослеживается под покровом мезозойских и кайнозойских отложений одноименного прогиба от приустьевой части р. Лена до устья р. Анабар. Его положение устанавливается по линейной магнитной аномалии и градиентной ступени силы тяжести. Морфология разлома свидетельствует о его взбросовой природе. Он приурочен к зоне затухания складок Оленекской ветви и, таким образом, является естественной границей между складчатой областью и Сибирской платформой.

Сейсмический процесс в северном секторе Верхоянского складчато-надвигового пояса развивается как в условиях растяжения (побережье Оленекского и Анабарского заливов), так и обстановки сжатия (п-ов Таймыр, дельта р. Лена). Сейсмогеодинамический анализ всех исходных данных позволил выделить в пределах дельты р. Лена структурно-динамические сегменты с различным типом напряженно-деформируемого состояния земной коры, которые контрастно отображают кинематический план зоны сочленения главных геоструктур (см. рис. 3). По субдолготному правому сдвигу основная часть дельты р. Лена разделена на два динамических сегмента с транспрессионным (на западе) и транстенсионным (на востоке) типом сейсмотектонической деструкции земной коры. Между Оленекской и Арынской протоками в основании дельты р. Лена установлен однородно-деформируемый компрессионный режим, приуроченный к активизированным разломам субширотной ветви зоны динамического влияния Верхоянского краевого шва. Смена режимов сейсмотектонической деструкции происходит к западу и востоку от дельты р. Лена в акватории шельфа моря Лаптевых, где фиксируется смешанное поле тектонических напряжений (см. рис. 3).

По расчетам сейсмотектонических деформаций, в пределах Оленекского сектора Лено-Анабарского шва действует преимущественно режим растяжения земной коры с небольшим сдвиговым компонентом. Направления главных осей напряжений указывают на расположение их вкрест простирания основных тектонических элементов и при пологих углах погружения они имеют северо-восток-юго-западное направление [6, 8, 23]. Полученные данные свидетельствуют о том, что в пределах контакта континентальных структур Оленекского сектора Лено-Анабарского шва с Хараулахским сегментом происходит смена режима растяжения шельфа моря Лаптевых на сжа-

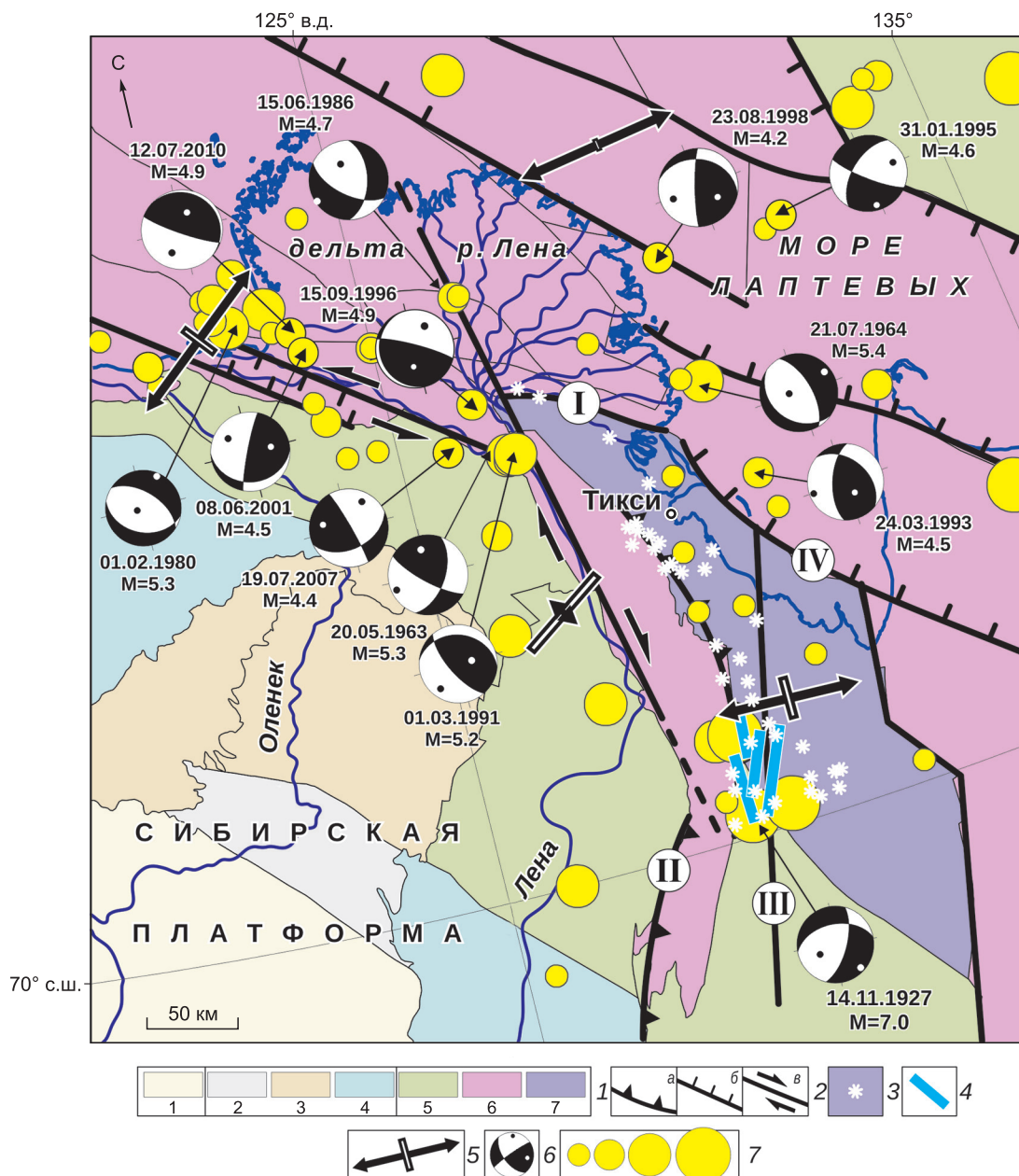


Рис. 3. Схема геодинамической активности неотектонических структур северного сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса (по [8] с изменениями).

Системы активных разломов: I – Приморская, II – Верхоянская, III – Хараулахская, IV – Буор-Хайнская.

I – классы геодинамической активности: 1 – низкой, 2–4 – умеренной, 5–7 – высокой; 2 – кинематика активных разломов: а – надвиги, б – сбросы, в – сдвиги; 3 – сейсмопроявления; 4 – сейсмодислокации; 5 – горизонтальная проекция главных осей деформаций: длина стрелок соответствует форме тензора деформаций и определенному сейсмотектоническому режиму; 6 – фокальные механизмы землетрясений: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черные точки) и растяжения (белые точки); 7 – эпицентры землетрясений с магнитудой (M_w), соответственно: $\leq 4,0$, 4,1–5,0, 5,1–6,0, 6,1–7,0 (по [32, 33]).

Fig. 3. Schematic map of geodynamic activity of the neotectonic structures in the northern sector of the Verkhoyansk fold-nappe belt (after [8] with modifications).

Active faults systems: I – Primorsky, II – Verkhoyansk, III – Kharaulakh, IV – Buor-Khaya.

I – classes of geodynamic activity: 1 – low, 2–4 – moderate, 5–7 – high; 2 – kinematics of active faults: a – thrusts, б – normal faults; в – strike-slips; 3 – seismic traces; 4 – seismodislocations; 5 – horizontal projections of principal stress axes (arrow's length corresponds to strain tensor and seismotectonic regime); 6 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), principal stress axes of compression and extension (black and white dots, respectively); 7 – earthquakes epicenters with M_w : $\leq 4,0$, 4,1–5,0, 5,1–6,0, 6,1–7,0 (after [32, 33]).

тие и значительно повышается уровень сейсмической активности (рис. 3). Зона хорошо выражена в градиентном поле новейших вертикальных тектонических движений [5], но не нашла отражение в значениях скоростей современных движений (рис. 2).

Лено-Алданский сектор. В северо-восточной части Алданской антеклизы отмечаются зоны среднего ($m_b = 4,1-5,0$) и высокого ($M_s = 6,5$) уровней сейсмической активизации (см. рис. 2, 4). Для структур сектора характерны низкие (2–4 мм/год) и отрицательные (–2 мм/год) скорости современных вертикальных движений, значения которых возрастают (до 12 мм/год) в Лено-Амгинском междуречье и снижаются в юго-восточном направлении (см. рис. 4). Территория исследований, несмотря на кажущуюся внешнюю простоту своего геолого-структурного и геоморфологического строения, представляет собой сложно построенную область [2]. Нижне-Алданская впадина имеет асимметричное строение, характерное для предгорных впадин, заполнявшихся осадочными отложениями одновременно с ростом смежного хребта (см. рис. 4, вставка). Анализ рельефа цоколя палеоген-неогеновых образований, представленных отложениями аллювиальных песков, озерно-болотных глин и глинистых песчаников, показывает, что максимальные значения мощности отложений (до 950 м) отмечены в областях растяжения кулис левого сдвига (Усть-Алданский разлом), трансформируемого по долине р. Алдан (см. рис. 4).

В наиболее прогнута северном борту впадины отложения олигоцена слагают большую часть разреза (до 770 м). Их накопление было сопряжено с тектоническими деформациями смежного субширотного сектора Верхоянского складчато-надвигового пояса (см. рис. 4). Отложения северного борта впадины местами залегают под углами 20–30° и осложнены надвигами, несогласно перекрытыми покровом горизонтально залегающих позднеплиоценовых песков, слагающих верхнюю террасу долин Лена и Алдана (см. рис. 4). Они разорваны поперечными локальными сдвигами с видимой амплитудой смещения 7–10 км, которые определяются по материалам среднемасштабной геологической съемки и дешифруются в виде контрастных линий на космоснимках. Возраст надвигов и сопряженных с ними деформаций датируется как конец миоцена–начало плиоцена [25].

Для определения степени активизации новейших и разрывных структур был проведен совместный анализ геологических, тектонических, топографических карт и космических снимков среднего масштаба [2]. На правом берегу р. Алдан, где широко распространены среднеплейстоценовые флювиогляциальные отложения (до 60 м), представленные галечниками, валунниками и песками, состоящими из терригенных пород, в результате тектонофизического анализа деформаций [13] выявлены смещения данных отложений молодыми диагональными разломами северо-западного и северо-восточного простираний, соответственно лево- и правосдвиговой кинематики. Выдержанность ориентировки сдвигов свидетельствует об однородности поля тектонических напряжений всей Лено-Алданской зоны, которое определяется тангенциальным сжатием в субширотном простирании [6].

При дешифрировании космических материалов (снимки Landsat-8 и BingMap) якутскими исследователями [26] на территории Лено-Вилуйского междуречья были установлены линейные разрывы левосдвиговой кинематики, имеющие северо-западное и субширотное простирания. Они проявляются в геометрии морфодинамических характеристик рельефа и сопровождаются сейсмической активизацией. Данная система разломов является южной ветвью региональной левосдвиговой системы и совместно с Усть-Алданским разломом контролирует развитие Нижне-Алданской впадины (см. рис. 4). Таким образом, наличие плиоцен-четвертичных деформаций в Нижне-Алданской впадине, дифференцированные скорости современных вертикальных тектонических движений и сейсмическая активизация свидетельствуют о современной структурной перестройке Лено-Алданского сектора и повышают уровень ее сейсмического потенциала [2].

Нелькано-Кыллахский сегмент. Данная зона активизации протягивается вдоль границы Южно-Верхоянского сектора с Сибирской платформой (рис. 5). Структура зоны определяется крутыми листрическими надвигами, переходящими на глубине в полого погружающиеся к востоку срывы, которые приурочены к глинистым горизонтам нижнего и среднего рифея [13]. На западе Нелькано-Кыллахской зоны эти отложения по фронтальным надвигам перекрывают субгоризонтально залегающие отложения юры и мела Сибирской платформы. На восточное крыло

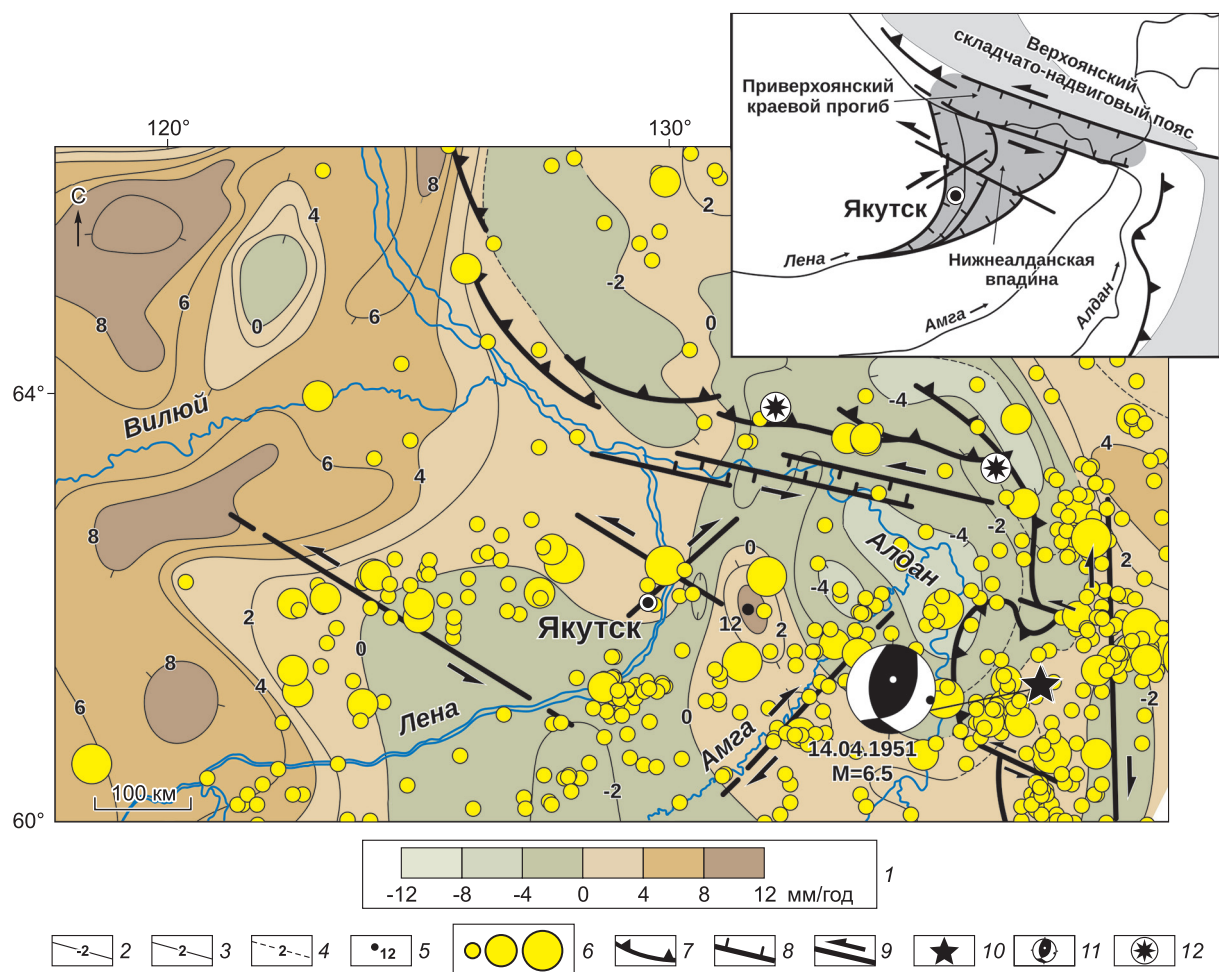


Рис. 4. Схема сейсмотектоники и скоростей современных вертикальных тектонических движений Лено-Алданского сектора.

Во вставке показан современный структурный план.

1 – шкала скоростей современных вертикальных тектонических движений (мм/год); 2–4 – изолинии скоростей современных вертикальных тектонических движений (мм/год), по [4]: 2 – отрицательные, 3 – положительные, 4 – предполагаемые; 5 – максимальные значения скоростей современных вертикальных тектонических движений (мм/год); 6 – эпицентры землетрясений с магнитудой (M_w), соответственно: $\leq 3,0$, $3,1-4,0$, $4,1-5,0$ (по [32, 33]); 7–9 – кинематика активных разломов: 7 – взбросонадвиги, 8 – сбросы, 9 – сдвиги; 10 – эпицентр Кыллахского землетрясения; 11 – фокальный механизм землетрясения: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черные точки) и растяжения (белые точки); 12 – сейсмотектонические деформации.

Fig. 4. Schematic map of seismotectonic and rates of modern vertical tectonic movements of Lena–Aldan sector.

In inset, modern structural plan.

1 – scale of rates of modern vertical tectonic movements (mm/yr); 2–4 – isolines of rates of modern vertical tectonic movements (mm/yr), after [4]: 2 – negative, 3 – positive, 4 – supposed; 5 – maximum velocity values; 6 – earthquakes epicenters with $M_w \leq 3,0$, $3,1-4,0$, $4,1-5,0$ (after [32, 33]); 7–9 – kinematics of active faults: 7 – thrusts, 8 – normal faults, 9 – strike-slips; 10 – epicenter of Kyllakh earthquake; 11 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), principal stress axes of compression and extension (black and white dots, respectively); 12 – seismotectonic deformations.

надвинуты венд-кембрийские сложно деформированные толщи Сетте-Дабанской тектонической зоны [27]. Доказательством новейшей активизации Нелькано-Кыллахской зоны являются деформации Китчанского надвига и Градыгской синклинали, затрагивающие своими горизон-

тальными движениями неоген-плейстоценовые отложения Нижне-Алданской впадины [13]. В Кыллахском блоке зарегистрировано Сетте-Дабанское (Кыллахское) землетрясение с магнитудой $M_s = 6,5$. Фокальный механизм его очага, определенный как взбросодвиг, выявил две

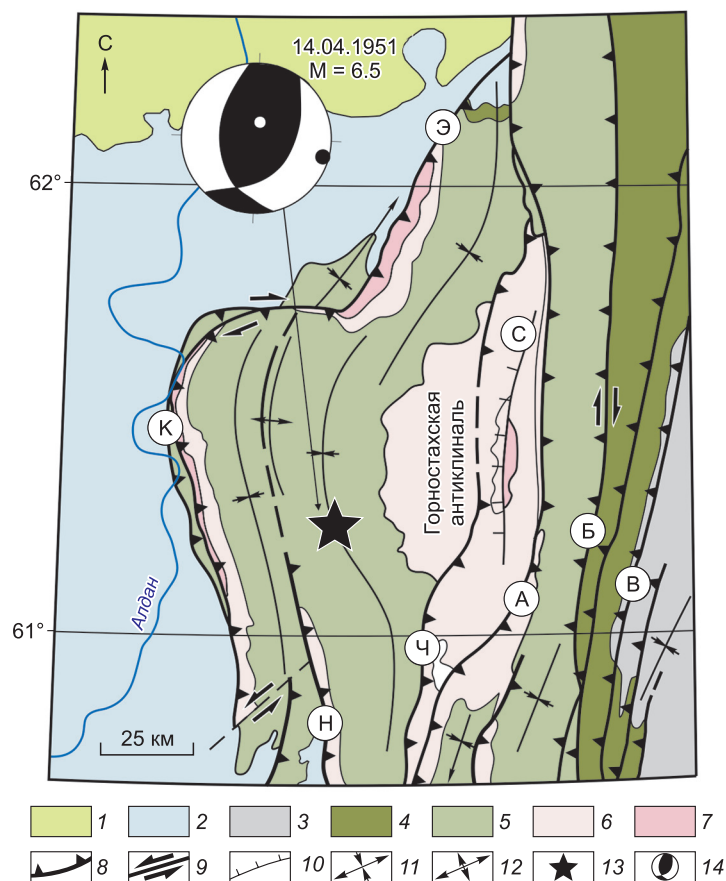


Рис. 5. Структурно-тектоническая схема Кыллахского блока Южно-Верхоянского сектора (по [13] с дополнениями). Разломы: К – Кыллахский, Э – Эбейке-Хаятинский, Н – Нельканский, Ч – Чагдинский, А – Акринский, Б – Бурхалинский, В – Восточно-Сеттедабанский, С – Светлинский.

1–7 – отложения: 1 – меловые, 2 – юрские, 3 – каменноугольно-пермские, 4 – ордовик-силур-девонские, 5 – венд-кембрийские, 6 – средне-верхнерифейские, 7 – нижнерифейские; 8–10 – кинематика активных разломов: 8 – надвиги; 9 – сдвиги; 10 – сбросы; 11, 12 – оси: 11 – синклиналий; 12 – антиклиналий; 13 – эпицентр Кыллахского землетрясения; 14 – фокальный механизм землетрясения: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черная точка) и растяжения (белая точка).

Fig. 5. Structural–tectonic scheme of Kyllakh block, South Verkhoyansk Sector (after [13] with additions).

Faults: К – Kyllakh, Э – Ebeike–Khayata, Н – Nel’kan, Ч – Chagda, А – Akra, Б – Burkhala, В – East Sette Daban, С – Svetlinskiy.

1–7 – ages of deposits: 1 – Cretaceous, 2 – Jurassic, 3 – Carboniferous–Permian, 4 – Ordovician–Silurian–Devonian, 5 – Vendian–Cambrian, 6 – Middle–Upper Riphean, 7 – Lower Riphean; 8–10 – kinematics of active faults: 8 – thrusts; 9 – strike-slips; 10 – normal faults; 11, 12 – axes: 11 – of synclines, 12 – of anticlines; 13 – epicenter of Kyllakh earthquake; 14 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), principal stress axes of compression and extension (black and white dots, respectively).

активные субдолготные плоскости [5]. По северо-восточной плоскости устанавливаются правые сдвиги, по северо-западной плоскости – левые сдвиги (см. рис. 5). Структура деформационного поля Южно-Верхоянского сектора, где произошло Сетте-Дабанское (Кыллахское) землетрясение, является сложной, что связано с наложением в Нелькано-Кыллахской зоне сопряженных систем активных разломов Охотско-Чукотского и восточного сегмента Байкало-Станового

сейсмических поясов (см. рис. 1, 2). Фокальные механизмы землетрясений, определенные для контактных сегментов, непосредственно примыкающих к Нелькано-Кыллахской зоне с востока и юга, указывают на восток–северо-восточную ориентацию напряжений сжатия, что хорошо согласуется с типами тектонических деформаций данной зоны [6, 23].

Зона динамического влияния западного сегмента Станового краевого шва. Здесь наибо-

лее активизирована юго-восточная часть Предпатомского прогиба, выраженная в виде сложно построенной синклинальной структуры, которая может рассматриваться как длительно развивающийся Предпатомский краевой прогиб [13, 28]. Тектонические структуры прогиба являются пограничными и активизированы в сейсмотектоническом отношении активными процессами как Байкальской рифтовой зоны, так и Становой складчатой системы. Юго-восточная часть Предпатомского прогиба сложена мощными позднедокембрийскими отложениями, суммарная мощность которых в центральной ее части достигает 12–14 км, а к периферии уменьшается до 4–5 км. Выделяются внешняя Приленская и внутренняя Бодайбинская подзоны, существенно различающиеся по своему строению (рис. 6).

Во внешней подзоне Патомского краевого шва развиты линейные асимметричные складки, опрокинутые в сторону платформы. Наиболее сложным строением характеризуются складки, протягивающиеся вдоль северо-восточного фланга Предпатомской зоны близ границы ее с Березовской впадиной, характеризующиеся крутыми крыльями (30–70°) и узкими сводами. На северо-западном фланге зоны развиты менее крутые, иногда брахиформные складки, осложненные нарушениями. По данным глубокого бурения и сейсморазведочным исследованиям было расшифровано внутреннее строение впадины [13]. Установлено, что картируемые линейные складки и антиклинальные зоны являются отражением сложной глубинной надвиговой структуры, представляющей собой комбинацию различных типов дуплексов, рамповых антиклиналей и чешуйчатых веерообразных структур. Западный борт Березовской впадины нарушен фронтальными надвигами Жуинской системы, по которым рифейские толщи перекрывают кембрийские отложения западного склона Алданской антеклизы. В тыловой части зоны, западнее Жуинских надвигов, картируются кулисно ориентированные линейные складки, а сами разломы имеют комбинированную взбросо-правосдвиговую кинематику.

Сейсмотектонические исследования данной территории показывают, что в ее пределах продолжается формирование обширных сводовых поднятий. В ряде случаев современные движения земной коры приобретают контрастный характер, что приводит к активизации краевых швов и региональных разрывных нарушений. Такие тектонические подвижки могут сопровож-

даться проявлениями сейсмической активности. Прямым подтверждением возможности появления сейсмических событий служат ряд местных землетрясений, зарегистрированных в 1957–2018 годах (см. рис. 6). Зона сейсмичности выражена в виде единичных землетрясений, которые отмечены на левобережье р. Лена (между Пеледудом и Олекминском), а также на севере Патомского нагорья. В Березовском прогибе отмечено Средне-Ленское (Меликчанское) землетрясение с $M_w = 5,5–5,7$, эпицентр которого расположен в бассейне р. Бирюк, левого притока р. Лена [5]. Его механизм (правый взбрососдвиг по субдолготной плоскости) полностью отражает стиль тектонических деформаций в зоне контакта (по Жуинскому разлому) структур Предпатомского прогиба и Алданской антеклизы, а также направленность сейсмотектонической активизации от структур Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса к Сибирской платформе.

Зона динамического влияния центрального сегмента Станового краевого шва. По данным дешифрирования космических снимков выявлен активизированный уступ Чульмаканского разлома, который прослеживается в рельефе на древней поверхности выравнивания и по всем признакам выраженности в современном рельефе относится к активным разломам [7]. В плане уступ представляет собой ломаную линию, включающую сегменты северо-восточного и субширотного простираний (рис. 7). Местами разлом выражен в виде эшелонированной серии кулисообразных уступов и трещин отрыва, указывающих на наличие левосторонней сдвиговой компоненты смещения. Высота уступов изменяется от первых метров до 13–15 м. Для мест, где простирание уступа меняется от северо-восточного на субширотное, характерно наличие в основании уступа грабенов, что указывает на растяжение в направлении примерно $157–337 \pm 8^\circ$ и, косвенно, левосдвиговый компонент при вспарывании субширотных фрагментов. Глубина грабенов, без учета их заполнения осадками, достигает 2,0–2,5 м при ширине до 140 м.

Иркутскими сейсмогеологами проводились тренчинговые исследования с целью изучения строения сейсмогенных деформаций в разрезах канав. Канавками, пройденными вкост простиранию уступов, были вскрыты нарушенные сейсмическими смещениями юрские песчаники и перекрывающие их элювиальные и делювиальные образования. Мощность кайнозойских, пре-

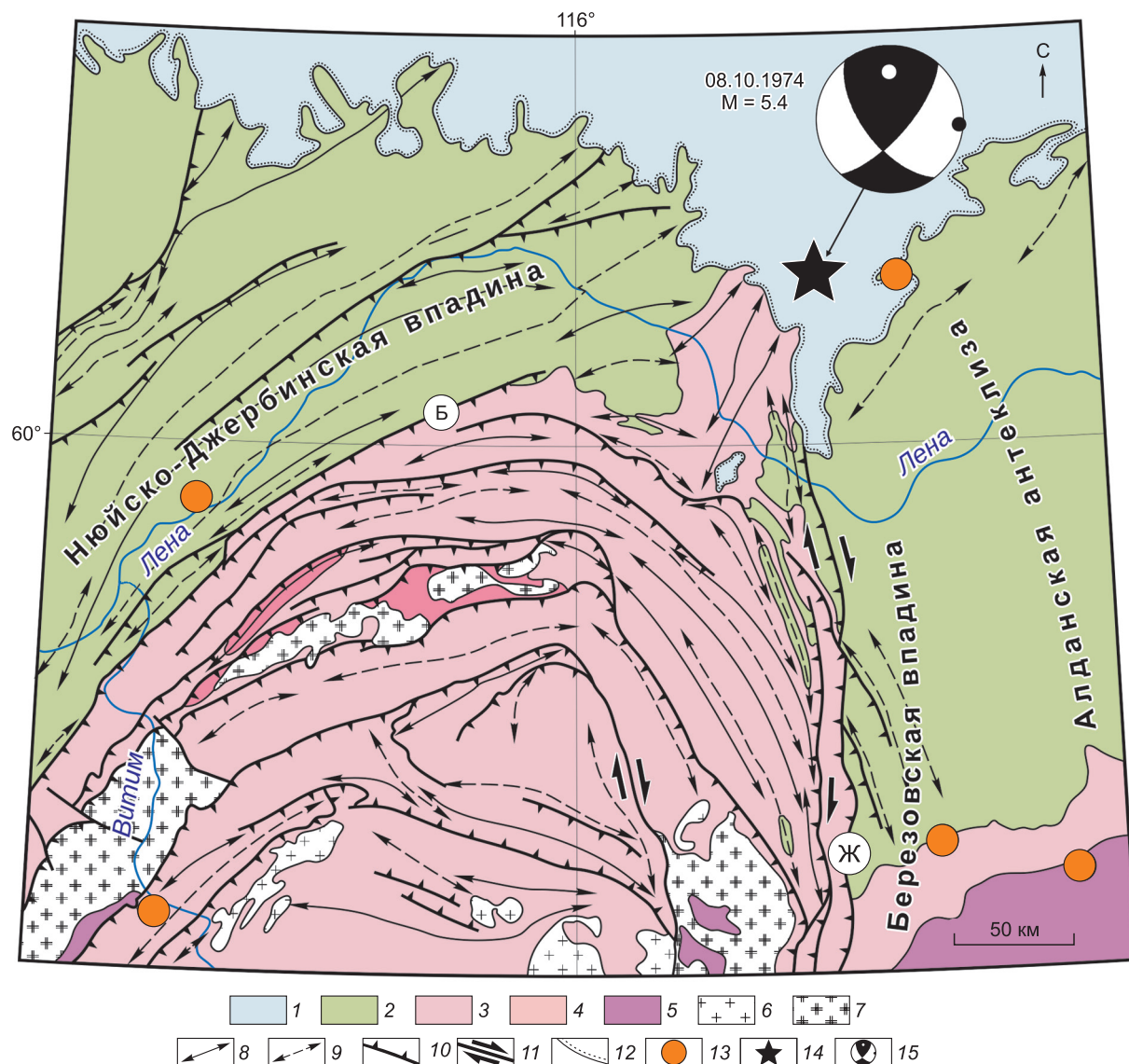


Рис. 6. Структурно-тектоническая схема Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса (по [13] с дополнениями). Разломы: Б – Байкало-Патомский, Ж – Жуинский.

1–5 – отложения: 1 – юрские, 2 – нижнесреднепалеозойские, 3 – рифей-вендские, 4 – нижнепротерозойские, 5 – архейские; 6, 7 – гранитоиды: 6 – палеозойские, 7 – протерозойские; 8, 9 – оси: 8 – антиклиналий, 9 – синклиналий; 10 – надвиги; 11 – сдвиги; 12 – угловое несогласие; 13 – эпицентры землетрясений с $M_w \geq 4,0-5,0$ (по [32, 33]); 14 – эпицентр Средленского землетрясения; 15 – фокальный механизм землетрясения: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полу-сфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черная точка) и растяжения (белая точка).

Fig. 6. Structural-tectonic scheme of the Baikal-Patom fold and thrust belt (after [13] with additions).

Faults: Б – Baikal-Patom, Ж – Zhuya.

1–5 – deposits: 1 – Jurassic, 2 – Lower-Middle Paleozoic, 3 – Riphean-Vendian, 4 – Lower Proterozoic, 5 – Archean; 6, 7 – granitoids: 6 – Paleozoic, 7 – Proterozoic; 8, 9 – axes: 8 – anticlines, 9 – syncline; 10 – thrusts; 11 – strike-slips; 12 – angular unconformity; 13 – earthquakes epicenters with $M_w \geq 4,0-5,0$ (after [32, 33]); 14 – epicenter of the Middle Lena earthquake; 15 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), principal stress axes of compression and extension (black and white dots, respectively).

имущественно плейстоцен-голоценовых, отложений не превышает 2–3 м, что вполне закономерно для водораздельных участков поверхности выравнивания. Поэтому канавами были вскры-

ты сейсмогенные разрывы, деформирующие не только рыхлые молодые образования, но и коренные породы. Во многих местах вдоль уступа деградация свободной поверхности не заверше-

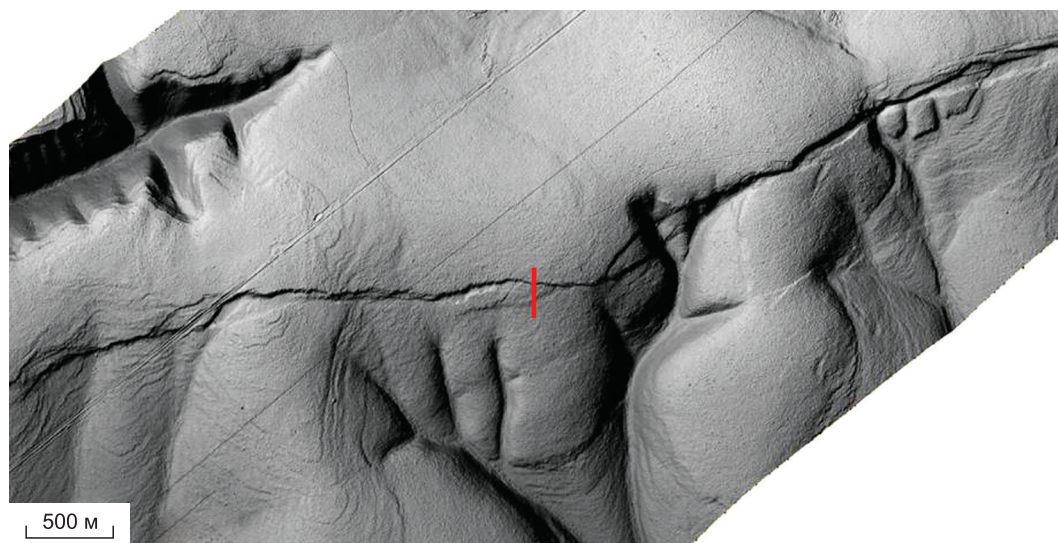


Рис. 7. Схема цифровой модели рельефа Чульмаканского разлома с выраженным уступом в зоне разлома.

Fig. 7. Digital elevation model for Chulmakan fault with well-expressed escarpment in fault zone.

на, она не задернована и даже не перекрыта полностью рыхлыми осадками, что косвенно может свидетельствовать об относительно молодом возрасте дислокации. В канаве плоскость смещения подходит к забою практически вертикально. Это свидетельствует о сбросовой кинематике дислокации. Об условиях растяжения, ориентированного перпендикулярно разлому, свидетельствуют раскрытые трещины, расположенные параллельно главному разрыву преимущественно на поднятом крыле. В канавах, вскрывших основания уступов и обрамляющих просевший приразломный блок, отмечены инъекционные дайки и конволюции. Вертикальная амплитуда разовых смещений составляет 1,0–1,5 м. Полученный абсолютный возраст проб радиоуглеродного датирования образцов свидетельствует о сейсмической активизации разлома 1500 ± 270 и 3900 ± 350 лет назад [7]. Наличие Чульмаканской палеосейсмодислокации с потенциальной магнитудой $M_w = 7,0$ свидетельствуют о направленности динамики сейсмогенерирующих процессов зоны динамического влияния центрального сегмента Станового краевого шва и формирования очаговых зон сильных землетрясений в контактных структурах Сибирской платформы.

Зона динамического влияния восточного сегмента Станового краевого шва. Нами рассмотрена сеймотектоническая позиция Тыркиндской шовной зоны, которая протягивается с северо-запада на юго-восток от устья р. Тимптон до среднего течения р. Алгама, где образует раз-

ломный узел совместно с Идюмским, Южно-Токинским и Атугей-Нуямским дизъюнктивами (рис. 8). Тектоническая структура зоны представлена системой кулисообразно расположенных локальных разломов, которые определяют местоположение нижнепротерозойских трогов и мезозойских грабенов [14, 28]. В строении зоны участвуют тектонические пластины, образованные различными ассоциациями парагнейсов и автономными анортозитами. Пластины ограничены узкими зонами бластомилонитов, которые в субдолготной ветви зоны насыщены телами гранитов [14, 29]. Шовная зона также отчетливо трассируется цепочками линейных магнитных аномалий, а в поле силы тяжести она распознается протяженными линейными полосами повышенных градиентов и резкой градиентной ступенью. Кинематика Тыркиндской системы разломов обусловлена рядом параллельных кулис, пространственное расположение которых указывает на возможные смещения вдоль нее по типу правого сдвига.

Влияние Тыркиндского разлома как сейсмогенерирующей структуры на активизацию юго-восточных зон Сибирского кратона была установлена сравнительно недавно [2]. В центральной части юго-восточного сегмента Алданского щита в зоне динамического влияния Тыркиндской шовной зоны зарегистрировано Гонамское землетрясение с $M_s = 5,4$. Сейсмогеодинамический анализ очаговой зоны данного сейсмического события, механизм формирова-

ния его очага и пространственное расположение афтершокового поля подтверждают правосдвиговую кинематику Тыркандинской шовной зоны (см. рис. 8, врезка).

Геометрический рисунок Тыркандинской шовной зоны по отношению к Становому блоку указывает на наличие зоны сжатия, морфологически выраженной транспрессионным блоком Токинского Становика (см. рис. 8). Токинский Становик – интенсивно развивающийся неотектонический блок, сложен преимущественно архейскими породами. С севера он оконтурен четко выраженной в рельефе линией Южно-Токинского надвига с амплитудой вертикальных тектонических движений 1000–1200 м. Центральная часть блока раздроблена серией разломов преимущественно субширотного и северо-западного простираний, к которым приурочен ряд сейсмических событий ($M_s = 5,0–5,5$) со взбросо-левосдвиговыми фокальными механизмами [30]. Интенсивные дифференцированные восходящие движения Токинского Становика обусловили резкую расчлененность его рельефа и крутизну склонов. Вследствие этого здесь преимущественно развиты гравитационные процессы, многие из них имеют сейсмогенный характер, также выявлены палеосейсмодислокации с потенциальной магнитудой $M_s = 7,0$ [5]. Свидетельством высокой тектономагматической активности Токинского Становика в неоген-четвертичное время является наличие базальтового вулканизма верхнемиоцен-нижнеплейстоценового возраста с хорошо сохранившимися аппаратами центрального типа [30]. Сейсмический потенциал Тыркандинской шовной зоны определяется преимущественно блоковым характером новейших движений, который отражает общую тенденцию тектонического развития территории.

Обсуждение результатов исследований

Сеймотектонические исследования, проведенные для новейших структур Сибирской платформы и активных сегментов краевых шовных зон, позволили выявить региональные закономерности процесса сеймотектонической деструкции земной коры и определить динамику формирования очаговых зон землетрясений. Независимо от особенностей геологического строения и предыдущей истории развития деформируемой среды, краевые швы Сибирского кратона сформированы в соответствии с динамикой зон коллизии главных литосферных плит и обладают общей с ней

структурной организацией. Латеральная зональность полей тектонических напряжений, установленная в строении Арктико-Азиатского и Байкало-Станового сейсмических поясов, указывает на транспрессионный механизм формирования сейсмогенерирующих структур [6]. Осевые части зоны взаимодействия плит характеризуются сдвиговым и взбрососдвиговым типом напряженно-деформируемого состояния земной коры, которое по направлению к краевым швам Сибирского кратона сменяется на надвиговый (см. рис. 1). Смена полей тектонических напряжений указывает на определенную «нейтрализацию» уровня сейсмической активности по отношению к активизированным зонам кратона.

Наиболее активизированные структуры Сибирского кратона ($M_w = 5,0–6,6$), характеризующиеся максимальным сейсмическим потенциалом, приурочены к зонам динамического влияния краевых швов. Они контрастно проявлены в градиентном поле новейших вертикальных тектонических движений [5], но расположены в мозаичном поле средних и низких значений скоростей современных вертикальных тектонических движений (см. рис. 2). Разломы шовных зон пространственно сближены с главными сейсмогенерирующими структурами Верхояно-Колымской и Байкало-Становой складчатых систем и сопряжены с ними по определенному кинематическому типу, образуя динамопары. В данных зонах проявлены основные эпицентрально-полевые Сибирского кратона, сейсмологические параметры которых, полностью отражают стиль тектонических деформаций сопряженных разломных систем.

Слабо активизируемые структуры Сибирской платформы ($M_w = 3,5–5,0$), характеризующиеся наибольшими значениями скоростей современных вертикальных тектонических движений, по видимому, имеют гетерогенный генезис динамики формирования (см. рис. 2). Высокоградиентные зоны деформаций новейших и современных тектонических движений, фиксируемые на северном борту Анабарской антеклизы, незначительно удалены от фронтальных блоков Лено-Таймырской и Хараулахской зон активизации, что сказывается на повышенном уровне сейсмической активизации данной структуры. Плановый рисунок современных тектонических движений восточного и южного бортов Анабарской антеклизы типичен для периферических зон гляциоизостатических поднятий платформ. Скорость вертикальных движений в аналогичных структурах достигает

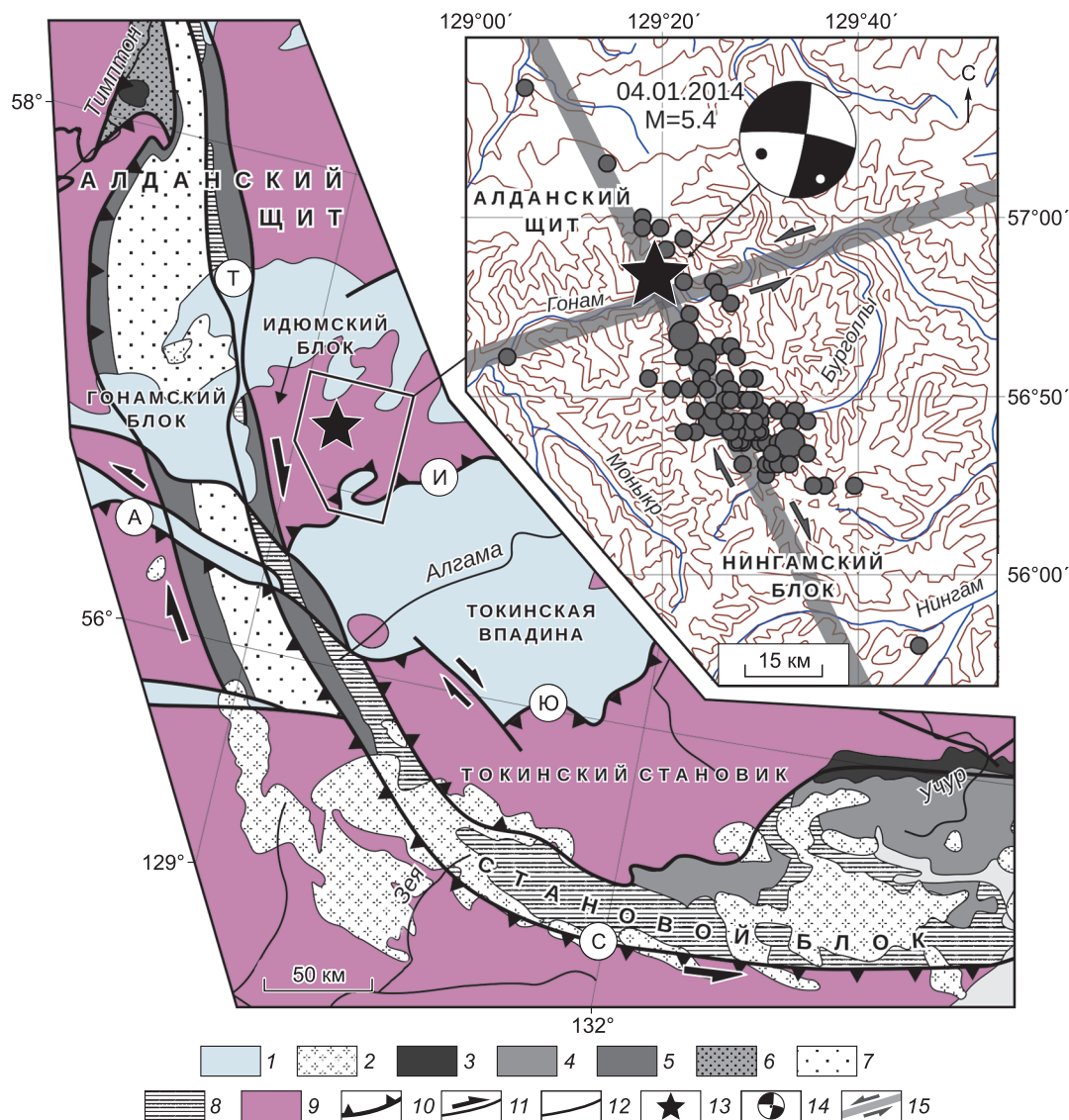


Рис. 8. Структурно-тектоническая схема юго-восточного сегмента Алданского щита и Станового блока (по [14] с дополнениями).

Контуром на рисунке обозначено положение вставки. На вставке показано морфоструктурное строение эпицентральной зоны Гонамского землетрясения.

Разломы: А – Атугей-Нуямский, И – Идюмский, Ю – Южно-Токинский, С – Становой, Т – Тыркандинский.

1 – чехол Сибирской платформы; 2 – мезозойские сиениты; 3 – раннепротерозойские чарнокиты; 4 – раннепротерозойские анортозиты; 5 – гнейсограниты; 6 – плагиогнейсы; 7 – гранат-биотитовые плагиогнейсы; 8 – биотитовые гнейсы; 9 – террейны; 10–12 – кинематика активных разломов: 10 – взброснадвижки, 11 – сдвиги, 12 – не установлена; 13 – эпицентр Гонамского землетрясения; 14 – фокальный механизм землетрясения: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черная точка) и растяжения (белая точка); 15 – зоны динамического влияния сопряженных сдвигов: эпицентры и афтершоки (серые кружки) Гонамского землетрясения.

Fig. 8. Structural-tectonic scheme of southeastern segment of Aldan Shield and Stanovoy block (after [14] with additions).

Inset, morphostructural structure of Gonam earthquake epicentral zone; frame in figure denotes location of inset.

Faults: A – Atugei-Nuyam, I – Idyum, Y – South Toko, S – Stanovoy, T – Tyrkanda.

1 – cover of Siberian Platform; 2 – Mesozoic syenites; 3 – Early Proterozoic charnokites; 4 – Early Proterozoic anorthosites; 5 – gneiss-granites; 6 – plagiogneisses; 7 – garnet-biotite plagiogneisses; 8 – biotite gneisses; 9 – terranes; 10–12 – kinematics of active faults: 10 – thrusts, 11 – strike-slips, 12 – undefined; 13 – epicenter of Gonam earthquake; 14 – earthquake focal mechanisms: date and magnitude (lower hemisphere), principal stress axes of compression (black and white dots, respectively); 15 – zones of dynamic influence of coupled strike slips: epicenters and aftershocks (gray-filled circles) of Gonam earthquake.

десятков сантиметров в год. Это на 1–2 порядка превышает их значения вне ледниковых зон [15], что сопоставимо с геодезическими параметрами антеклизы.

В пределах платформенных структур, исключая области проявления гляциоизостазии, значительную роль играют флюидогеохимические процессы, индикаторами воздействия которых на геологическую среду являются месторождения флюидного генезиса [19]. В центральном сегменте Оленекского сектора сформированы обширные высокоградиентные зоны деформаций с максимальными значениями скоростей новейших и современных движений (см. рис. 2). Из-за локализации в данном сегменте месторождений северной группы Якутской алмазоносной провинции именно флюидогеохимические процессы могут быть здесь первопричиной значительных скоростей движений. Южная зона активизации Сибирской платформы расположена в изометричном низкоградиентном поле низких и отрицательных значений скоростей современных движений (см. рис. 2). Помимо местных сейсмических событий слабого и среднего уровня ($M_w = 4,0–5,0$), данная зона может испытывать также транзитные воздействия от сильных землетрясений из Байкало-Станового сейсмического пояса.

На востоке Сибирской платформы, где находится Вилуйская группа нефтегазовых месторождений, выделяются высокоградиентные зоны современных поднятий, не совпадающие с соответствующими тектоническими структурами и не имеющие четкого выражения в рельефе (см. рис. 2). Они не обнаруживают однозначной связи с распределением глубинных температур и плотностными неоднородностями литосферы. Возможно, динамика развития данных зон связана с флюидными процессами, которые могли привести к разуплотнению вещества и поднятию земной поверхности. В связи с тем что высокоградиентные зоны приближены к Центральному сектору Верхоянского складчато-надвигового пояса, а флюиды существенно влияют на упругие свойства горных пород, здесь возможен процесс накопления тектонических напряжений и реализация новых сейсмических событий. В настоящее время эта территория отнесена к сейсмоопасной области с интенсивностью 5–6 баллов [6].

Выводы

1. Сеймотектонический анализ, проведенный в очаговых зонах сильных землетрясений

краевых шовных зон Сибирского кратона, позволил оценить значимость используемых параметров как проявлений единого процесса накопления и разрядки напряжений в земной коре и дифференцированно обозначить зоны повышенной сейсмической активности. Прямая корреляционная зависимость между уровнем сейсмической активности новейших структур и количественными характеристиками скоростей новейших и современных тектонических движений отсутствует. При сеймотектонических исследованиях более корректно использовать значения скоростей движений за неотектонический этап развития.

2. Зоны реактивизации краевых швов и фронтальные сегменты Верхоянского краевого шва и Байкало-Становой складчатой системы оказывают динамическое влияние на стиль тектонических деформаций и сейсмическую активизацию смежных участков Сибирской платформы. Для выявления направленности динамики сейсмогенерирующих процессов и определения доминирующих режимов сеймотектонической деструкции земной коры необходимо использовать данные по средним тензорам сеймотектонических деформаций, а также по очаговым характеристикам землетрясений умеренных магнитуд, которые были зарегистрированы за пределами областей однородного деформирования земной коры.

3. Сейсмический потенциал активных сегментов Верхоянского краевого шва и Байкало-Становой складчатой системы и контактных структур Сибирской платформы определяется по известным зависимостям силы землетрясения от протяженности активизированных разломов и кинематических характеристик очага землетрясений [31]. В рассмотренных структурах магнитуда инициируемых ими землетрясений и интенсивность проявлений возможных максимальных сотрясений (по шкале MSK-64), может значительно превысить установленные для них нормативы.

Литература

1. Артюшков Е.В., Кориковский С.П., Массон Х.-Й., Чехович П.А. Природа плиоцен-четвертичных поднятий земной коры на докембрийских кратонах // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Материалы I Тектонического совещания. М.: ГЕОС. 2018. Т. 1. С. 11–14.
2. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сейсмическая активизация новейших структур Сибирского кратона // Геотектоника. 2018. № 6. С. 36–54. DOI: 10.1134/S0016853X18060036

3. Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Геодинамические характеристики новейших структур Оленекского и Вилюйского районов Якутской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 11. С. 1499–1513. DOI: 10.15372/GiG2020107
4. Бочаров Г.В., Гусев Г.С., Есипова Л.В., Спектор В.Б. Карта современных движений территории Якутской АССР // Геотектоника. 1982. № 3. С. 60–63.
5. Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмотектоника Якутии. М.: ГЕОС, 2000. 227 с.
6. Карта сейсмотектоники Восточной Сибири. Масштаб 1 : 4000000 / Г.С. Гусев, Л.П. Имаева, И.И. Колодезников (отв. ред.). 2015. DOI: 10.2205/ESDB-VONZ-125-map. http://neotec.ginras.ru/neomaps/M080_Siberia-E_2015_Seismotectonics.jpg
7. Стром А.Л., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Овсяченко А.Н., Гриб Н.Н., Сясько А.А. Сейсмотектонические исследования Чульмаканского разлома (Южная Якутия) для определения сейсмической угрозы нефтепровода «Восточная Сибирь – Тихий океан» и газопроводной системы «Сила Сибири» // Геотектоника. 2017. № 6. С. 1–8. DOI: 10.7868/S0016853X17060078
8. Сейсмотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики / Л.П. Имаева, И.И. Колодезников (отв. ред.). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 136 с.
9. Itaeva L.P., Itayev V.S., Koz'min B.M. Dynamics of the zones of strong earthquake epicenters in the Arctic–Asian seismic belt // Geosciences. 2019. Vol. 9, No 4. P. 1–21. DOI: 10.3390/geosciences9040168.
10. Имаева Л.П., Имаев В.С., Середкина А.И. Сейсмотектонические деформации активных сегментов зоны сопряжения Колымо-Омолонского супертеррейна и Южно-Анхойской сутуры, северо-восток России // Геотектоника. 2021. № 1. С. 1–18. DOI: 10.31857/S0016853X21010069
11. Структура и эволюция земной коры Якутии / Г.С. Гусев, А.Ф. Петров, Г.С. Фрадкин (ред.). М.: Наука, 1985. 246 с.
12. Прокопьев А.В., Парфенов Л.М., Томилин М.Д., Колодезников И.И. Чехол Сибирской платформы и смежных складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин (ред.). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 113–155.
13. Прокопьев А.В., Дейкуненко А.В. Деформационные структуры складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин (ред.). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 156–198.
14. Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф. Фундамент Северо-Азиатского кратона. Алдано-Становой щит // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин (ред.). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 81–104.
15. Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры (Геолого-геоморфологические и сейсмотектонические вопросы) М.: Наука, 1977. 240 с.
16. Artyushkov E.V. Abrupt continental lithosphere weakenings as a precondition for fast and large-scale tectonic movements // Geotectonics. 2003. No. 2. P. 107–123.
17. Трифонов В.Г. Неотектоника Евразии. М.: Научный мир, 1999. 252 с.
18. Трифонов В.Г., Артюшков Е.В., Додонов А.Е., Бачманов Д.М., Миколайчук А.В., Вишняков Ф.А. Плиоцен-четвертичное горообразование в Центральном Тянь-Шане // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 2. С. 128–145.
19. Летников Ф.А. Флюидный механизм деструкции континентальной земной коры и формирование осадочных нефтеносных бассейнов // Дегазация Земли: геофлюиды, нефть и газ, парагенезисы в системе горючих ископаемых // Тезисы докл. междунар. конференции, 30–31 мая – 1 июня 2006 г. Москва, ИГЕМ РАН. М.: ГЕОС, 2006. С. 6–9.
20. Дучков А.Д., Соколова Л.С. Термическая структура литосферы Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 2. С. 494–503.
21. Дучков А.Д., Железняк М.Н., Аюнов Д.Е., Веселов О.В., Соколова Л.С., Казанцев С.А., Горнов П.Ю., Добрецов Н.Н., Болдырев И.И., Пчельников Д.В., Добрецов А.Н. Геотермический атлас Сибири и Дальнего Востока (2009–2015) / <http://maps.nrcgit.ru/geoterm/map.ru>
22. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 194 с.
23. Имаева Л.П., Имаев В.С., Мельникова В.И., Козьмин Б.М. Новейшие структуры и тектонические режимы напряженно-деформированного состояния земной коры северо-восточного сектора Российской Арктики // Геотектоника. 2016. № 6. С. 3–22. DOI: 10.7868/S0016853X16060035
24. Драчев С.С. О тектонике фундамента шельфа моря Лаптевых // Геотектоника. 2002. № 6. С. 60–76.
25. Парфенов Л.М., Прокопьев А.В., Спектор В.Б. Рельеф земной поверхности и история его формирования // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин (ред.). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 12–32.
26. Костин А.В., Гриненко В.С., Олейников О.Б., Желонкина М.С., Кривошапкин И.И., Васильева А.Е. Первые данные о проявлении верхнемелового вулканизма зоны перехода «Сибирская платформа – Верхояно-Колымская складчатая область» // Наука и образование. 2015. № 1. С. 30–36.
27. Парфенов Л.М., Прокопьев А.В. Надвиговые структуры Кыллахской гряды (Южное Верхоянье) // Геология и геофизика. 1986. № 12. С. 3–15.
28. Гусев Г.С., Петров А.Ф., Фрадкин Г.С. Структура и эволюция земной коры Якутии. М.: Наука, 1985. 248 с.

29. Парфенов Л.М. Тектонический анализ // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин (ред.). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 69–80.

30. Imaeva L.P., Koz'min B.M., Imaev V.S., Grib N.N., Ashurkov S.V. Seismotectonic destruction of the Earth's crust in the zone of interaction of the northeastern side of the Baikal rift and the Aldan-Stanovoy block // Journal of Seismology. 2017. Vol. 21, No 2. P. 385–410. DOI: 10.1007/s10950-016-9607-3

31. Стром А.Л., Никонов А.А. Соотношение между параметрами сейсмогенных разрывов и магнитудой землетрясений // Физика Земли. 1997. № 12. С. 55–67.

32. International Seismological Centre. On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>. Thatcham, Berkshire, United Kingdom (last accessed January 2017).

33. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный), 2019. ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН.

Поступила в редакцию 19.02.2021

Принята к публикации 28.03.2021

Об авторах

ИМАЕВА Людмила Петровна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, улица Лермонтова, 128, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-8235-7112>, imaeva@crust.irk.ru;

КОЗЬМИН Борис Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, проспект Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-4270-1318>, b.m.kozmin@diamond.ysn.ru;

МАКАРОВ Александр Александрович, ведущий инженер, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677000, Якутск, проспект Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-6527-586>, haskin95@mail.ru;

МАККЕЙ Кевин Г., профессор, Департамент геологических наук, Университет штата Мичиган, MI 48824, Восточный Лансинг, США.

Информация для цитирования

Имаева Л.П., Маккей К.Г., Козьмин Б.М., Макаров А.А. Сейсмотектоническая реактивизация краевых шовных зон Сибирского кратона // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021, Т. 26, № 2. С. 7–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-1>

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-2-1

Seismotectonic reactivation of the marginal suture zones of the Siberian craton

L.P. Imaeva^{1, 2, *}, K.G. Mackey³, B.M. Koz'min⁴, A.A. Makarov⁴

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

²Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia

³Department of Geological Sciences, Michigan State University, East Lansing, USA

⁴Diamond and Precious Metal Geology Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

*imaeva@crust.irk.ru

Abstract. A comprehensive seismotectonic study of the tectonic structures of the Siberian Platform and its folded framing was carried out in order to identify the regional regularities of the processes of destruction of the Earth's Crust and the dynamics of the formation of focal zones of strong earthquakes. The data on the geological and geophysical structure, the newest structural plan, quantitative characteristics of the

newest and modern tectonic movements were analyzed. According to the degree of activity and orientation of geodynamic processes, regional principles for the classification of neotectonic structures with the rationale for their differentiation into classes were developed. The most active segments of the Verkhoyansk marginal suture and the Baikal-Stanovoy fold system are considered, which have a dynamic impact on the style of tectonic deformations of adjacent areas of the Siberian Platform, where strategic mineral deposits of the Republic of Sakha (Yakutia) are located. It is established that the most active structures are located in zones of the dynamic influence of marginal sutures. They are contrasted against the gradient field of modern vertical tectonic movements, but they are characterized by the mosaic field of the medium and low rates of modern movements. The level of their seismic activation and the kinematic type of seismotectonic deformations are modeled by global geodynamic processes taking place at the boundaries between the Eurasian, North American and Amur lithospheric plates. The weak activated structures of the Siberian Platform, which are characterized by the highest rates of modern movements, are heterogenic genesis. The dynamics of the formation of these high-gradient deformation zones may have been influenced by glacial isostatic movements. In order to correctly assess the degree of geodynamic activity of modern structures, special consideration should be given to all the factors that control seismogeodynamic processes, including tectonic stress accumulation, and the intensity of seismic events.

Key words: Siberian craton, marginal suture, seismogenerating structures, active faults, fluids, Late Cenozoic deformation, earthquake mechanism, potential seismicity.

Acknowledgements. *The studies were carried out with support from the RFBR under Project 19–05–00062 – Dynamics of the modern structures of the continental-shelf zone in the northeastern sector of the Russian Arctic.*

References

1. Artyushkov E.V., Korikovskii S.P., Masson Kh.-I., Chekhovich P.A. Nature of Pliocene–Quaternary crustal uplifts in the Precambrian cratons // *Problems of Tectonics and geodynamics of the Earth's Crust and Mantle. Proceedings of the L Meeting on Tectonics*. M.: GEOS, 2018. Vol. 1. P. 11–14.
2. Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M. Seismotectonic activation of modern structures of the Siberian Craton // *Geotectonics*. 2018. Vol. 52, No 6. P. 618–633. DOI: 10.1134/S0016852118060031
3. Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M. Geodynamic characteristics of neotectonic structures in the Olenek and Vilyui areas of the Yakutian kimberlite province // *Russian Geology and Geophysics*. 2020. Vol. 61, No 11. P. 1499–1513. DOI: 10.15372/RGiG2020107
4. Bocharov G.V., Gusev G.S., Esipova L.V., Spektor V.B. Map of contemporary movements in the territory of Yakutian ASSR // *Geotektonika*. 1982. No. 3. P. 60–63.
5. Imaev V.S., Imaeva L.P., Koz'min B.M. Seismotectonics of Yakutia. M.: GEOS, 2000. 227 p.
6. *Seismotectonic map of Eastern Siberia*. Scale 1 : 4000000 / G.S. Gusev, L.P. Imaeva, I.I. Kolodeznikov (Eds.). 2015. DOI: 10.2205/ESDB-VONZ-125-map. http://neotec.ginras.ru/neomaps/M080_Siberia-E_2015_Seismotectonics.jpg
7. Strom A.L., Imaev V.S., Smekalin O.P., Chipizubov A.V., Ovsyuchenko A.N., Grib N.N., Syas'ko A.A. Seismotectonic investigations of the Chulmakan fault, Southern Yakutia, to assess the seismic hazard for the East Siberia–Pacific Ocean oil and power of Siberia Gas Pipelines // *Geotectonics*. 2017. Vol. 51, No. 6. P. 584–590. DOI: 10.1134/S0016852117060073
8. *Seismotectonics of the Northeastern sector of Russian Arctic* / L.P. Imaeva, I.I. Kolodeznikov (Eds.). Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2017. 136 p.
9. Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M. Dynamics of the zones of strong earthquake epicenters in the Arctic–Asian seismic belt // *Geosciences*. 2019. Vol. 9, No 4. P. 1–21. DOI: 10.3390/geosciences9040168.
10. Imaeva L.P., Imaev V.S., Seredkina A.I. Seismotectonic deformation of active segments of conjugation zone of Kolyma–Omolon superterrane and South Anui suture (Southeastern regions of Russia) // *Geotectonics*. 2021. No 1. P. 1–18. DOI: 10.31857/S0016853X21010069
11. *Structure and evolution of the Earth's crust of Yakutia* / G.S. Gusev, A.F. Petrov, G.S. Fradkin (Eds.). M.: Nauka, 1985. 246 p.
12. Prokopiev A.V., Parfenov L.M., Tomshin M.D., Kolodeznikov I.I. Sedimentary cover of the Siberian Platform and adjacent fold-and-thrust belts // *Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)* / L.M. Parfenov, M.I. Kuz'min (Eds.). M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 113–155.
13. Prokopiev A.V., Deikunenko A.V. Deformation structures of thrust fold belts. *Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)* / L.M. Parfenov, M.I. Kuz'min (Eds.). M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 156–198.
14. Smelov A.P., Zedgenizov A.N., Timofeev V.F. *Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)* / L.M. Parfenov, M.I. Kuz'min (Eds.). M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 81–104.
15. Nikonov A.A. Holocene and Present-Day movements of the Earth's Crust // *Geological-geomorphic and seismotectonic problems*. M.: Nauka, 1977. 240 p.

16. *Artyushkov E.V.* Abrupt continental lithosphere weakenings as a precondition for fast and large-scale tectonic movements // *Geotectonics*. 2003. No. 2. P. 107–123.
17. *Trifonov V.G.* Neotectonics of Eurasia. M.: Scientific world, 1999. 252 p.
18. *Trifonov V.G., Artushkov E.V., Dodonov A.E., Bachmanov D.M., Mikolaichuk A.V., Vishnyakov F.A.* Pliocene-Quaternary Mountain Formation in the Central Tien Shan // *Geology and Geophysics*. 2008. Vol. 49, No 2. P. 128–145.
19. *Letnikov F.A.* Fluid mechanism of continental crust destruction and formation of sedimentary oil basins. Degassing of the Earth: Geofluids, Oil and Gas, Parageneses in the System of Fossil Fuels / Abstracts of the International Conference. M.: GEOS, 2006. P. 6–9.
20. *Duchkov A.D., Sokolova L.S.* Thermal structure of the lithosphere of the Siberian Platform // *Geology and Geophysics*. 1997. Vol. 38, No 2. P. 494–503.
21. *Duchkov A.D., Zheleznyak M.N., Ayunov D.E., Veselov O.V., Sokolova L.S., Kazantsev S.A., Gornov P.Yu., Dobretsov N.N., Boldyrev I.I., Pchel'nikov D.V., Dobretsov A.N.* Geothermal atlas of Siberia and Russian Far East (2009–2015) / <http://maps.nrcgit.ru/geoterm/map.ru>. Accessed February 16, 2015.
22. *Balobaev V.T.* Geothermy of permafrost zone in the lithosphere of North Asia. Novosibirsk: Nauka, 1991. 194 p.
23. *Imaeva L.P., Imaev V.S., Mel'nikova V.I., Koz'min B.M.* Recent structures and tectonic regimes of the stress–strain state of the Earth's crust in the northeastern sector of the Russian Arctic region // *Geotectonics*. 2016. No. 6. P. 3–22. DOI: 10.7868/S0016853X16060035
24. *Drachev S.S.* On the basement tectonics of the Laptev Sea shelf // *Geotectonics*. 2002. No. 6. P. 60–76.
25. *Parfenov L.M., Prokopiev A.V., Spektor V.B.* The relief of the Earth's surface and the history of its formation // *Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)* / L.M. Parfenov, M.I. Kuz'min (Eds.). M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 12–32.
26. *Kostin A.V., Grinenko V.S., Oleinikov O.B., Zhe-lonkina M.S., Krivoschapkin I.I., Vasilyeva A.E.* The first data on the manifestation of the Upper Cretaceous volcanism of the transition zone «Siberian Platform – Verkhoyansk-Kolyma fold region» // *Nauka i Obrazovanie*. 2015. No. 1. P. 30–36.
27. *Parfenov L.M., Prokop'ev A.V.* Thrusted structures of the Kyllakh Range (South Verkhoyansk region) // *Geology and Geophysics*. 1986. No. 12. P. 3–15.
28. *Gusev G.S., Petrov A.F., Fradkin G.S.* Structure and evolution of the Earth's Crust in Yakutia. M.: Nauka, 1985. 248 p.
29. *Parfenov L.M.* Tectonic analysis // *Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia)* / L.M. Parfenov, M.I. Kuz'min (Eds.). M.: MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. P. 69–80.
30. *Imaeva L.P., Koz'min B.M., Imaev V.S., Grib N.N., Ashurkov S.V.* Seismotectonic destruction of the Earth's crust in the zone of interaction of the northeastern side of the Baikal rift and the Aldan-Stanovoy block // *Journal of Seismology*. 2017. Vol. 21, No. 2. P. 385–410. DOI: 10.1007/s10950-016-9607-3
31. *Strom A.L., Nikonov A.A.* Relationship between the parameters of seismogenic ruptures and the magnitude of earthquakes // *Physics of the Earth*. 1997. No. 12. P. 55–67.
32. *International Seismological Centre*. On-line Bulletin, <http://www.isc.ac.uk>. Thatcham, Berkshire, United Kingdom (last accessed January 2017).
33. *Seismological Bulletin* (yearly), 2019. ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin. Obninsk: FRC GS RAS.

About the authors

IMAEVA Lyudmila Petrovna, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128 Lermontov Street, Irkutsk 664033, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-8235-7112>, imaeva@crust.irk.ru;

MACKEY Kevin G., professor, Department of Geological Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA;

KOZ'MIN Boris Mikhailovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-4270-1318>, b.m.kozmin@diamond.ysn.ru;

MAKAROV Aleksandr Aleksandrovich, leader engineer, Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS, 39 Lenina pr., Yakutsk 677000, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-6527-5863>, haskin95@mail.ru.

Citation

Imaeva L.P., Mackey K.G., Koz'min B.M., Makarov A.A. Seismotectonic reactivation marginal suture zones of the Siberian craton // *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021, Vol. 26, No. 2. P. 7–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-2-1>