

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВЕЙШИХ СТРУКТУР ОЛЕНЕКСКОГО И ВИЛЮЙСКОГО РАЙОНОВ ЯКУТСКОЙ КИМБЕРЛИТОВОЙ ПРОВИНЦИИ

Л.П. Имаева¹, В.С. Имаев^{1,3}, Б.М. Козьмин²

¹Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

²Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677077, Якутск, просп. Ленина, 39, Россия

³Академия наук Республики Саха, 677007, Якутск, просп. Ленина, 33, Россия

Для Оленекского и Вилюйского районов Якутской кимберлитовой провинции впервые проведено комплексное сейсмотектоническое исследование, направленное на установление степени геодинамической активности новейших структур Сибирского кратона и оценку экологической опасности групп кимберлитовых полей. По степени активности и направленности геодинамических процессов разработаны региональные принципы классификации неотектонических структур Сибирского кратона и его горно-складчатого обрамления с обоснованием дифференциации их на классы. Проанализированы активные сегменты Верхоянского и Байкало-Патомского складчато-надвиговых поясов, которые оказывают динамическое влияние на стиль тектонических деформаций смежных участков Сибирской платформы, где локализованы группы кимберлитовых полей. Выявленные закономерности процессов сейсмотектонической деструкции позволили установить интенсивность и типы напряженно-деформированного состояния земной коры зон реактивации краевых швов Сибирского кратона. С применением методов математической статистики для Оленекского и Вилюйского районов Якутской кимберлитовой провинции проведен количественный анализ геодинамических показателей геологической среды по значимым факторам активизации новейших структур как проявлений единого процесса накопления и разрядки напряжений в земной коре. Комплекс сейсмотектонических данных позволил дифференцировать зоны активизации по степени интенсивности напряженно-деформированного состояния земной коры, а также оценить потенциальный экологический риск групп кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции.

Кимберлитовая провинция, кимберлитовые поля, активные разломы, кинематические типы, геодинамические характеристики, механизмы землетрясения, сейсмотектонические деформации, потенциальная сейсмичность, экологическая обстановка

GEODYNAMIC CHARACTERISTICS OF NEOTECTONIC STRUCTURES IN THE OLENEK AND VILYUI AREAS OF THE YAKUTIAN KIMBERLITE PROVINCE

L.P. Imaeva, V.S. Imaev, and B.M. Koz'min

The first comprehensive seismotectonic study was performed in the Olenek and Vilyui areas of the Yakutian kimberlite province, which was aimed at elucidating the geodynamic activity of neotectonic structures of the Siberian craton and assessing the environmental hazard of groups of kimberlite fields. Based on the degree of activity and trend of geodynamic processes, we have developed regional principles for the classification of neotectonic structures of the Siberian craton and its fold–thrust framing with the rationale for their differentiation into classes. The active segments of the Verkhoyansk and Baikal–Patom fold–thrust belts are analyzed, which have a dynamic effect on the mode of tectonic deformations of the adjacent sections of the Siberian Platform, where groups of kimberlite fields are localized. The revealed patterns of seismotectonic destruction processes made it possible to establish the intensity and types of the Earth's crust stresses and strains in the reactivation zones of the marginal sutures of the Siberian craton. Applying mathematical statistics methods permitted a quantitative analysis of the geodynamic parameters of the geologic environment in the Olenek and Vilyui areas of the Yakutian kimberlite province, based on the significant factors responsible for activation of the recent structures as manifestations of a single stress accumulation/discharge process in the Earth's crust. Using the set of seismotectonic data, we have differentiated the activation zones according to the stress–strain intensity in the Earth's crust and have assessed the potential environmental hazard of groups of kimberlite fields in the Yakutian diamondiferous province.

Kimberlite province, kimberlite fields, active faults, kinematic types, geodynamic characteristics, earthquake mechanism, seismotectonic deformations, potential seismicity, environmental hazard

ВВЕДЕНИЕ

Создание научных основ безопасных и эффективных технологий эксплуатации месторождений алмазов базируется на проведении разномасштабного сейсмотектонического анализа, данные которого учитывают фактор времени и отражают равномерную для конкретного уровня риска расчетную интен-

сивность сейсмических сотрясений. Геодинамические процессы, происходящие в земной коре, отличаются сложностью и зависят от множества факторов, их действие в разных по активности тектонических структурах проявляется дифференцированно. Проблема сейсмотектонической активизации структур докембрийских кратонов, которые традиционно считаются в тектоническом отношении стабильными областями, в последнее время пересматривается [Артюшков и др., 2018]. Как отмечалось нами ранее [Имаева и др., 2018], 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.

Исследования, представленные в данной статье, направлены на установление степени геодинамической активности новейших структур Сибирского кратона и оценку экологической опасности групп кимберлитовых полей Оленекского и Вилюйского районов Якутской алмазоносной провинции. Группы кимберлитовых полей данных районов расположены в различных тектонических структурах, а некоторые из них сближены с зонами динамического влияния краевых швов Сибирской платформы. На примере проведения комплексного сейсмотектонического изучения показано, что среднemasштабный анализ геодинамических параметров по значимым факторам активизации новейших структур позволяет дифференцировать контактные зоны краевых швов по степени интенсивности напряженно-деформированного состояния земной коры, а также оценить экологическую обстановку групп кимберлитовых полей Оленекского и Вилюйского районов Якутской алмазоносной провинции.

В процессе исследования решались следующие научные задачи:

- анализ опубликованных структурно-тектонических, геолого-геофизических, геодезических и сейсмологических данных;
- разработка региональных принципов классификации неотектонических структур Сибирского кратона с обоснованием дифференциации их на классы;
- выявление активных сегментов Верхоянского и Байкало-Патомского складчато-надвиговых поясов, которые оказывают динамическое влияние на стиль тектонических деформаций кимберлитовых полей смежных участков Сибирской платформы;
- установление интенсивности и типов напряженно-деформированного состояния земной коры зон реактивизации краевых швов зон Сибирского кратона;
- проведение количественного анализа геодинамических характеристик геологической среды по значимым показателям факторного анализа;
- оценка потенциального экологического риска групп кимберлитовых полей Оленекского и Вилюйского районов Якутской алмазоносной провинции.

В основу работы 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.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения поставленных задач нами был применен новый комплекс исследований, направленный на выявление степени геодинамической активности новейших структур Оленекского и Вилюйского районов Якутской кимберлитовой провинции и определение параметров их сейсмотектонических деформаций. По степени активности и направленности геодинамических процессов для всей территории Сибирского кратона были разработаны региональные принципы классификации неотектонических структур с обоснованием дифференциации их на классы [Карта..., 2015; Гусев и др., 2016; Сейсмотектоника..., 2017; Имаева et al., 2017]. Новейший геодинамический площадной таксон территориального ранга рассматривается нами как пространственно локализованный целостный объект с многофакторным взаимодействием его основных компонентов в разрезе земной коры. Здесь мы используем термины «домен» и «новейшая структура» как синонимы, а термин «сегмент» объединяет ряд доменов (новейших структур), которые в своем развитии подчиняются единым геодинамическим условиям.

Классификация доменов представляет собой многоуровневую систему, состоящую из восьми классов активности современных геодинамических процессов формирования неотектонических структур. Каждый класс активности характеризуется свойственным ему набором и оптимальным количеством признаков. В их числе рассматриваются следующие факторы: тектонический (геодинамическая обстановка); вещественный, геофизический (величина теплового потока, аномалии поля силы тяжести, мощность земной коры); морфоструктурный (высота рельефа, его контрастность, скорость вертикального и горизонтального перемещения земной поверхности). Дополнительно рассматривалась унаследованность динамики неотектонических структур в зависимости от условий формирования в предшествующие этапы развития домена, а также деформационные признаки и GPS данные. Определение геодинамической активности неотектонических структур и установление конкретного класса осуществ-

влялась путем интерпретации как первичных, так и дополнительных характеристик. По степени активности новейших тектонических движений классы доменов объединяются в три группы: низкая (классы 1, 2), умеренная (классы 3—5) и высокая (классы 6—8). Зональность активности геодинамических процессов неотектонических структур Сибирской платформы ее горно-складчатого обрамления представлены на рис. 1.

Геодинамические показатели деформации геологической среды, способные вызвать экологические последствия, в первую очередь связаны с интенсивностью проявлений напряженно-деформированного состояния земной коры, позволяющих оценить степень ее деструкции. Такими данными могут являться: сейсмичность; новейшие и современные тектонические движения; особенности распространения тектонической трещиноватости и сети разрывных нарушений и др. Набор геодинамических показателей геологической среды для платформенных и орогенных структур, характеризующихся различным типом напряженно-деформированного состояния земной коры, существенно отличается. Этот факт должен учитываться другими исследователями. Для оценки значимости геодинамических характеристик Оленекского и Вилюйского районов Якутской кимберлитовой провинции нами была применена методика (*R*-модификация) факторного анализа, которая является многомерно-статистической и выделяет вклады отдельных факторов [Гзовский, 1975; Николаев, 1980]. Данная методика впервые была применена нами при сейсмотектоническом анализе активных структур зон коллизии Арктико-Азиатского и Байкало-Станового сейсмических поясов, где подробно описаны подсчеты плотностных характеристик и классификация активности современных геодинамических процессов [Имаев и др., 2000; Имаева и др., 2005]. При этом принимались во внимание следующие факторы: плотность разломов (*P*), градиенты новейших вертикальных тектонических движений (*Grad V*), амплитуда новейших тектонических движений (*A*), плотность эпицентров землетрясений (*S*), геофизические данные, характеризующие аномалии поля силы тяжести (*G*).

Рассмотренные матрицы корреляционных связей площадного факторного анализа показали наличие положительных значимых связей между отдельными переменными. Наиболее устойчивы между собой ассоциации следующих элементов: плотность разломов—плотность эпицентров—геофизические данные ($r = 0.6$); плотность разломов—градиент новейших тектонических движений—амплитуда новейших тектонических движений ($r = 0.3$). Одной из форм записи полученных значений сравнимых параметров служат факторные уравнения, представляющие собой произведение множителей, расположенных в последовательном порядке по мере уменьшения соответствующего коэффициента корреляции. По результатам анализа уравнение геодинамического процесса может быть записано в следующем виде: $F = P_{0.8} \times A_{0.6} \times \text{Grad } V_{0.6} \times S_{0.5} \times G_{0.4}$. При этом три первых фактора (показателя) являются наиболее весомыми и в сумме достигают 80 % влияния: плотность разломов, амплитуда новейших тектонических движений и градиент новейших вертикальных тектонических движений. При оценке потенциального экологического риска групп кимберлитовых полей Оленекского и Вилюйского районов мы пользовались наиболее значимыми показателями факторного анализа (плотность разломов и градиенты новейших вертикальных тектонических движений). Другие геодинамические факторы: тепловой поток, скорость современных вертикальных тектонических движений, сейсмическая активность, принимались во внимание в виде абсолютных величин при определении класса геодинамической активности неотектонических структур и итоговой оценке экологического риска групп кимберлитовых полей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Активизация тектонических структур Сибирского кратона. Основную часть Сибирского кратона занимает платформа, образованная сложнодеформированными метаморфическими породами фундамента, которые перекрыты пологозалегающими осадочными и вулканическими отложениями чехла [Мокшанцев и др., 1975; Гусев и др., 1985; Прокопьев и др., 2001]. Верхоянский и Байкало-Патомский складчато-надвиговые пояса являются ее восточной и южной окраинами (рис. 2). Верхоянский складчато-надвиговой пояс образован мощным (до 15 км) клином деформированных пород карбона, перми, триаса и юры, представляющих собой типичные накопления пассивной континентальной окраины [Гусев и др., 1985; Прокопьев, Дейкуненко, 2001]. Байкало-Патомский складчато-надвиговой пояс — недифференцированная зона, сложенная 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 [Гусев и др., 1985; Смелов и др., 2001].

За новейший этап тектонического развития структуры Сибирского кратона испытали сравнительно дифференцированные поднятия, величины которых колеблются от 100 до 1500 м. Важной особенностью неотектонической структуры является большая плотность линейных тектонических нарушений [Гусев и др., 1985]. Границы неотектонических структур совпадают с активизированными разломами

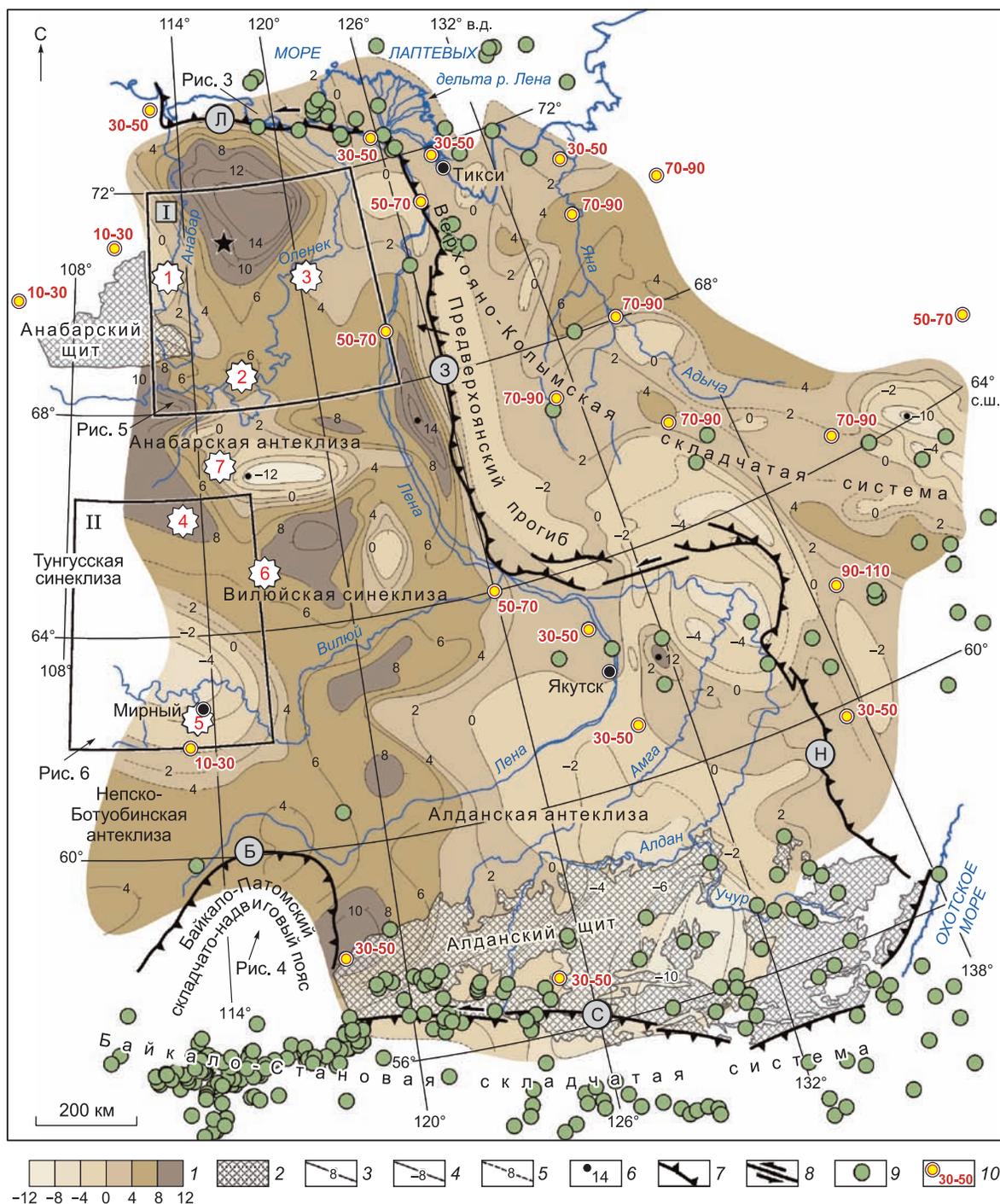


Рис. 2. Тектоническое строение Сибирского кратона, по [Парфенов и др., 2001] с изменениями и дополнениями.

Крайевые швы: Л — Лено-Анабарский, З — Западно-Верхоянский, Н — Нелькано-Кыллахский, С — Становой, Б — Байкало-Патомский. 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 [Бочаров и др., 1982]: 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 [Карта..., 2015]; 10 — значения теплового потока (мВт/м²), по [Дучков и др., 2015]. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

различного ранга, возраста и глубины заложения. Это указывает на то, что новейшие движения носят преимущественно блоковый характер и отражают общую тенденцию тектонического развития территории [Имаева и др., 2018]. Степень геодинамической активности новейших структур Сибирского кратона (см. рис. 1) и плановое распределение элементов (см. рис. 2) показывают, что наиболее высокие показатели геодинамической активности свойственны региональным сдвиговым зонам и краевым швам надвиговой природы, отделяющим Сибирскую платформу от Верхояно-Колымской и Байкало-Становой складчатых систем. Для центральных областей Сибирской платформы типичны низкие и умеренные значения характеристик геодинамической активности неотектонических структур (см. рис. 1).

Обращает на себя внимание факт, что слабоактивизируемые структуры платформы отличаются дифференцированным полем скоростей современных вертикальных тектонических движений и их высокими значениями (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, что на 1–2 порядка превышает их значения вне ледниковых зон и это сопоставимо с геодезическими параметрами Анабарской антеклизы [Никонов, 1977]. Другим фактором активизации тектонических структур докембрийских кратонов в плиоцен-четвертичное время, возможно, является поступление в литосферу за последние несколько миллионов лет большого объема флюидов [Трифонов, 1999; Артюшков, 2003; Трифонов и др., 2008; Артюшков и др., 2018; и др.]. Индикаторами их воздействия на геологическую среду считаются месторождения флюидного генезиса, в том числе и кимберлиты [Летников, 2006]. Примером активизации данного типа может являться Оленекский кимберлитовый район, где сформированы обширные высокоградиентные зоны деформаций с максимальными значениями скоростей новейших и современных вертикальных тектонических движений (см. рис. 2).

К геодинамическим факторам активизации новейших структур платформы и реактивизации ее краевых швов помимо структурно-динамических характеристик относятся и данные теплового потока (см. рис. 2). Для Сибирской платформы типично преобладание низких значений, которые составляют в среднем 20–35 мВт/м² [Дучков, Соколова, 1997; Дучков и др., 2015]. 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 кимберлитовой провинции Сибирского кратона 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. [Балобаев, 1991]. В аналогичных кимберлитовых провинциях платформ Америки и Африки средний геотермический тепловой поток практически одинаков и изменяется в пределах 46–54 мВт/м². Вследствие этого тепловые аномалии Якутской кимберлитовой провинции, возможно, являются «поверхностными» и не отражают температурные условия в глубоких слоях земной коры.

Сейсмотектоника. В данном подразделе проанализированы активные сегменты Верхоянского и Байкало-Патомского складчато-надвиговых поясов, оказывающих динамическое влияние на стиль тектонических деформаций смежных участков Сибирской платформы, где локализованы группы кимберлитовых полей Оленекского и Виллойского районов Якутской кимберлитовой провинции. 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 (см. рис. 1, 2). В данных зонах проявлены основные эпицентральные поля, сейсмологические параметры которых полностью отражают стиль тектонических деформаций сопряженных разломных систем. Активизация краевых шовных зон оказывает динамическое воздействие на возникновение в контактных структурах Сибирской платформы проявлений местной сейсмичности.

В Оленекском кимберлитовом районе, расположенном в основном в градиентной зоне умеренных значений показателей геодинамической активности, зарегистрированы единичные местные сейсмические события средней интенсивности с $M_w = 4.0–5.5$. Основная зона проявлений местной сейсмичности проходит в пределах Лено-Анабарского краевого шва, его тектонические структуры отделяют активную в сейсмическом отношении область шельфовой части моря Лаптевых от менее активных и пассивных структур северной и центральной части Сибирской платформы (см. рис. 1, 2). Тектонические структуры Лено-Анабарской шовной зоны отчетливо дешифрируются на аэрофото- и космоснимках, а также отражаются в геофизических полях [Прокопьев и др., 2001]. В качестве основных тектонических элементов здесь выделяются Анабаро-Хатангская седловина, Оленекский сектор Верхоянского складчато-надвигового пояса, Лено-Анабарский прогиб и Оленекское поднятие (рис. 3). Наиболее активен Оленекский сектор, его фронтальная зона, при ширине до 70 км протягивается на 500 км в широтном направлении от устья р. Лена до Хатангского залива. Тектонические структуры сектора представлены серией складок запад—северо-западного простирания, сформированных в мезозое под влиянием субширотных лево-

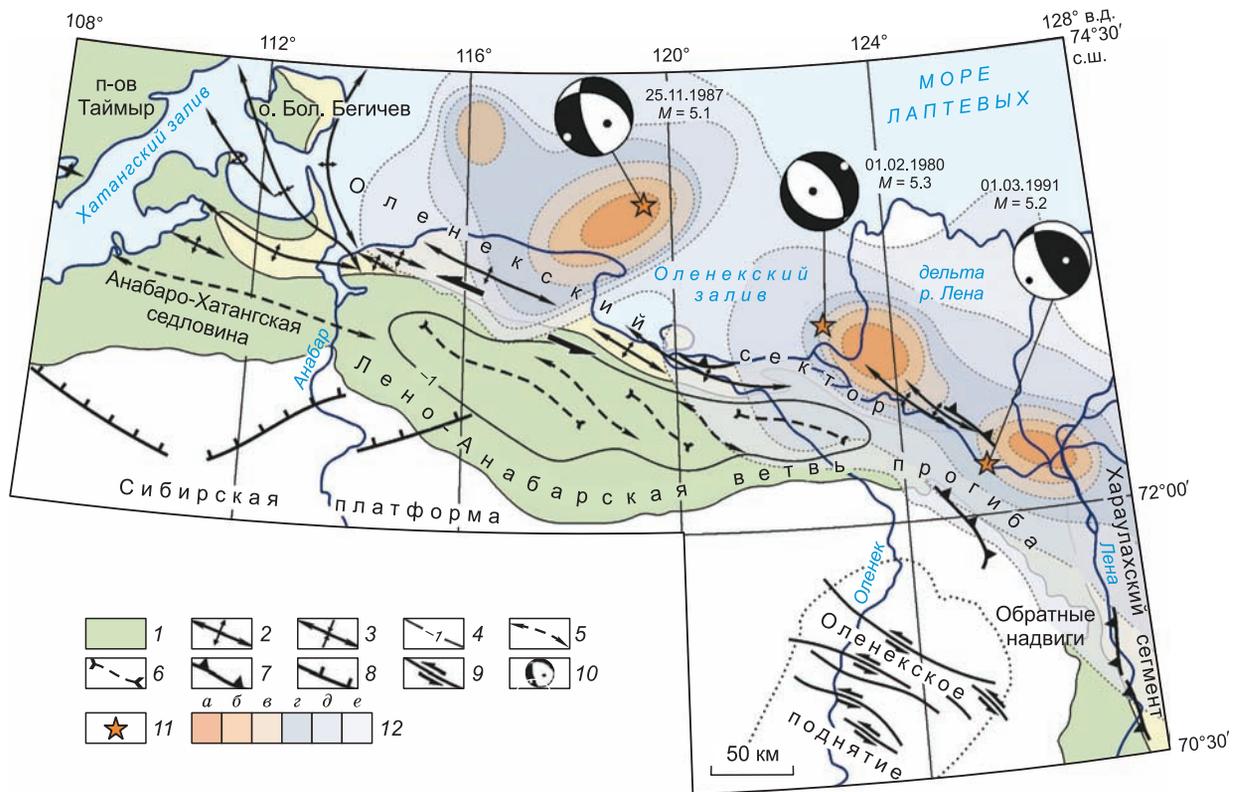


Рис. 3. Схема сейсмотектоники Оленекского сектора Лено-Анабарского сегмента, по [Имаева и др., 2016] с изменениями и дополнениями.

1 — континентальные нижнемеловые отложения; 2 — оси антиклиналей; 3 — оси синклиналей; 4 — изогипсы подошвы нижнего мела (км); 5 — оси конседиментационных валов; 6 — оси конседиментационных впадин; 7–9 — кинематика активных разломов: 7 — надвиги, 8 — сбросы, 9 — сдвиги; 10 — фокальные механизмы землетрясений: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выходы осей главных напряжений сжатия (черные точки) и растяжения (белые точки); 11 — местоположение эпицентра землетрясения; 12 — плотность эпицентров землетрясений (число событий на $1 \times 1^\circ$): а — 26–30, б — 21–25, в — 16–20, г — 11–15, д — 6–10, е — 1–5. Большими стрелками показано относительное перемещение блоков земной коры.

сдвиговых перемещений 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. Можно полагать, что Оленекский сектор в наземном выражении определяет фронт крупной позднемезозойской Верхоянской покровно-складчатой системы. В окрестностях дельты р. Лена зона деформаций меняет близдолготное простирание на субширотное и прослеживается под мощным чехлом Южно-Лаптевского рифтового прогиба до ее сопряжения с Южно-Таймырской складчатой зоной [Сейсмотектоника..., 2017].

Активизированные структуры Оленекского сектора в сейсмическом отношении приурочены к Лено-Таймырской зоне эпицентров землетрясений (см. рис. 1). За период инструментальных наблюдений здесь было отмечено около 400 местных землетрясений, происходящих в пределах земной коры на глубинах 10–30 км. Внутри зоны выделяются несколько максимумов сейсмической активности (см. рис. 3), которые коррелируются с субширотной системой гравитационных аномалий различной интенсивности. Сейсмический процесс в Лено-Таймырской эпицентральной зоне развивается как в условиях растяжения (дельта р. Лена, побережье Оленекского и Анабарского заливов), так и обстановки сжатия (п-ов Таймыр). Такое разнообразие решений фокальных механизмов объясняет наличие здесь различного кинематического спектра разрывных нарушений (сбросы, взбросы, сдвиги и их модификации). По расчетам сейсмотектонических деформаций в пределах Лено-Анабарского структурного шва действует преимущественно режим растяжения земной коры с небольшой сдвиговой компонентой. Азимут действия напряжений растяжения при сравнении с подобными в Лаптевоморской рифтовой зоне отличается своей ориентацией. 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 [Имаева и др., 2016].

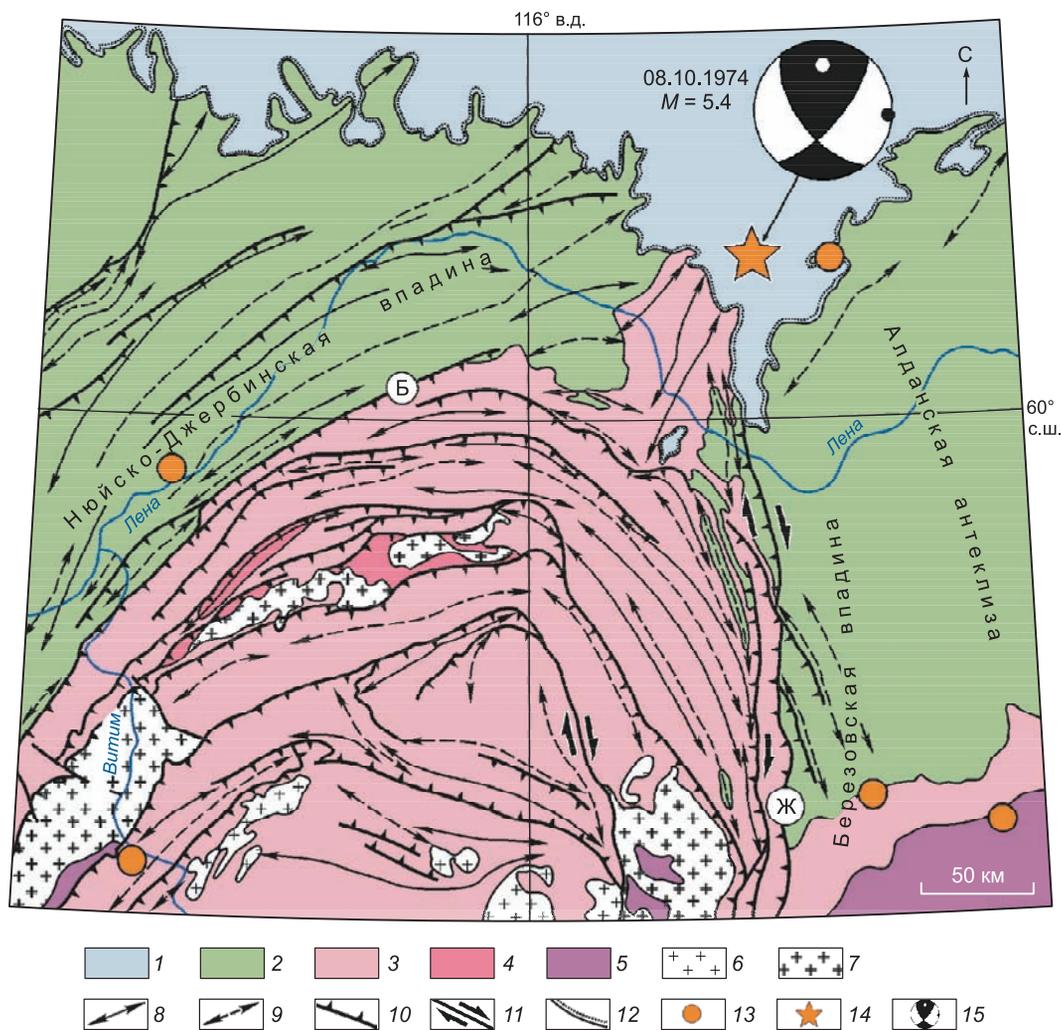


Рис. 4. Геолого-структурная схема Байкало-Патомского складчато-надвигового пояса, по [Проккопьев, Дейкуненко, 2001] с изменениями и дополнениями.

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 [Карта..., 2015]; 14 — эпицентр Среднеленского землетрясения; 15 — фокальный механизм землетрясения: дата возникновения события и магнитуда (нижняя полусфера), выход осей главных напряжений сжатия (черная точка) и растяжения (белая точка).

Вилуйский кимберлитовый район находится в зоне динамического влияния сейсмогенерирующих структур западного фланга Байкало-Станового сейсмического пояса (см. рис. 1, 2). Здесь наиболее активизирована юго-восточная часть Предпатомского прогиба, выраженная в виде сложнопостроенной синклиальной структуры, которая может рассматриваться как длительно развивающийся Предпатомский краевой прогиб [Гусев и др., 1985; Проккопьев, Дейкуненко, 2001]. Тектонические структуры прогиба являются пограничными и активизированы в сеймотектоническом отношении активными процессами как Байкальской рифтовой зоны, так и Становой складчатой системы. Юго-восточная часть Предпатомского прогиба сложена мощными позднедокембрийскими отложениями, их суммарная мощность в центральной 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. 4).

Во внешней подзоне Патомского краевого шва развиты линейные асимметричные, нередко опрокинутые в сторону платформы складки, интенсивность которых уменьшается в северном направлении. Наиболее сложное строение имеют 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 крупноамплитудными нарушениями. По данным глубокого бурения и сейсмо-разведочным исследованиям было расшифровано внутреннее строение впадины [Прокопьев, Дейкуненко, 2001]. Установлено, что картируемые линейные складки и антиклинальные зоны являются отражением сложной глубинной надвиговой структуры, представляющей собой комбинацию различных типов дуплексов, рамповых антиклиналей и чешуйчатых вееров. Базальный срыв надвиговой зоны последовательно переходит на более высокие стратиграфические уровни при движении в сторону Сибирской платформы. Суммарное горизонтальное тектоническое укорочение составляет 10—15 км. В тыловой части зоны рифейские отложения Патомского синклиория по Байкало-Патомской системе надвигов надвинуты на образования Ньюско-Джербинской впадины. Ядра крупных антиклинальных зон представлены дуплексами, реже одиночными рамповыми антиклиналями [Прокопьев, Дейкуненко, 2001]. 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 взбросоправосдвиговую 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 сопровождаться проявлениями сейсмической активности. Прямым подтверждением возможности появления сейсмических событий служат ряд местных землетрясений, зарегистрированных в 1957—2018 гг. (см. рис. 1, 3). Зона сейсмичности выражена в виде единичных землетрясений, отмеченных на левобережье р. Лена (между Пеледуем и Олекминском), а также на севере Патомского нагорья. В Березовском прогибе отмечено Средненское (Меличанское) землетрясение с $M_w = 5.5—5.7$, эпицентр которого расположен в бассейне р. Бирюк, левого притока р. Лены [Имаева и др., 2018]. Его механизм (правый взбросодвиг 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.

Геодинамические характеристики факторного анализа Оленекского и Вилюйского районов Якутской кимберлитовой провинции. При оценке геодинамических показателей факторного анализа для отдельных групп кимберлитовых полей мы пользовались наиболее значимыми из них: плотность разломов и градиенты новейших вертикальных тектонических движений (рис. 5, 6). Схемы амплитуд новейших вертикальных тектонических движений с обозначенными линиями активных разломов (см. рис. 5, а; 6, а), являлись расчетными для вышеобозначенных двух факторов.

Для *Оленекского* района, который объединяет Куонапскую (1—6), Среднеоленекскую (7—10) Нижнеоленекскую (11—15) группы кимберлитовых полей, характерно совпадение простирания изолиний плотности разломов и основных кимберлитоконтролирующих зон (см. рис. 5, б). Максимальная плотность разломов (≥ 5) отмечена для единичных кимберлитовых полей Куонапской и Среднеоленекской групп. В остальных случаях эта величина плотности разломов приурочена к областям сочленения региональных разломов (на севере участка) или к зонам их динамического влияния (на юге). Для Нижнеоленекской группы кимберлитовых полей характерно однородное поле средних плотностных значений, лишь центральная часть Толуокского поля находится в зоне минимальных величин. Куонапская группа кимберлитовых полей отличается более высоким уровнем тектонической трещиноватости. В основном ее поля тяготеют к областям высоких значений плотности разломов с переходом к средним величинам (Дюкенское, Лучаканское, Огонер-Юряхское и Куранахское поля). Исключение составляют Староречинское и часть Ары-Мастахского кимберлитового поля, где фиксируется максимальная плотность разломов. Среднеоленекская группа находится в зоне высоких плотностных значений (Восточно-Укукитское и Чомурдахское поля) с их переменной в сторону повышения (Западно-Ухукитское поле) и понижения величин плотности разломов (Мунское поле).

В пределах Оленекского кимберлитового района распространены значительные площади, занятые зонами максимальных и высоких значений градиента скоростей новейших вертикальных тектонических движений (см. рис. 5, в). Они приурочены к областям резко расчлененного рельефа, где развита сеть активных разрывных нарушений (см. рис. 5, а). Ориентация зон градиента скоростей соответствует простиранию основных морфоструктурных элементов участка. Области минимальных значений градиента расположены в основном на юге и оконтуривают выравненные водораздельные поверхности. Нижнеоленекская группа кимберлитовых полей характеризуется градиентными зонами со значительным разбросом их значений: от высоких на севере и западе до минимальных на юге. Для Куонапской группы кимберлитовых полей отмечается преобладание высоких и максимальных значений градиентных зон. Так, Лучаканское, Дюкенское и Куранахское поля находятся в однородных областях максимальных

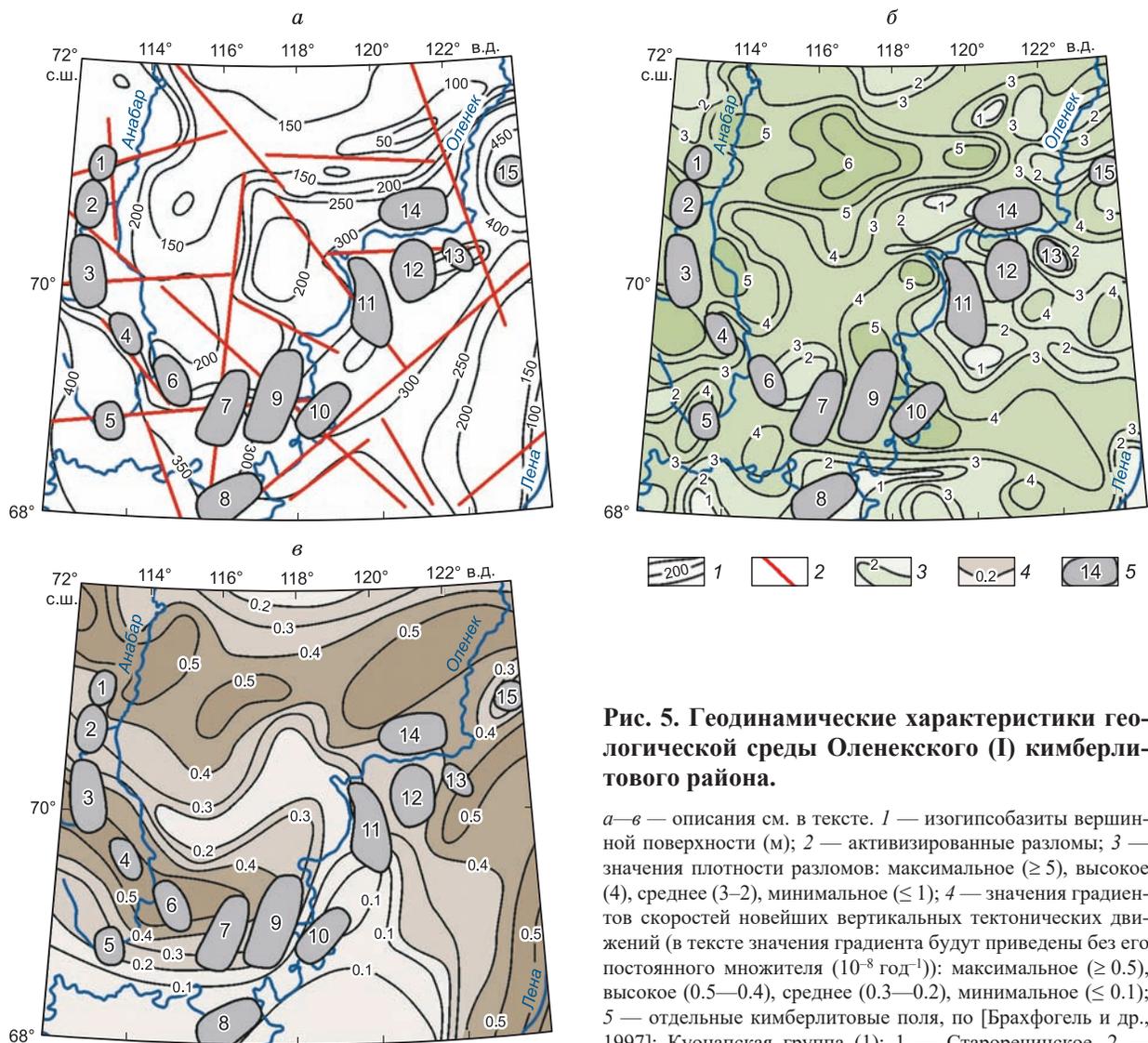


Рис. 5. Геодинамические характеристики геологической среды Оленекского (I) кимберлитового района.

а-в — описания см. в тексте. 1 — изогипсы вершинной поверхности (м); 2 — активизированные разломы; 3 — значения плотности разломов: максимальное (≥ 5), высокое (4), среднее (3–2), минимальное (≤ 1); 4 — значения градиентов скоростей новейших вертикальных тектонических движений (в тексте значения градиента будут приведены без его постоянного множителя (10^{-8} год^{-1}): максимальное (≥ 0.5), высокое (0.5–0.4), среднее (0.3–0.2), минимальное (≤ 0.1); 5 — отдельные кимберлитовые поля, по [Брахфогель и др., 1997]: Куонапская группа (1): 1 — Староречинское, 2 — Ары-Мастахское, 3 — Дюкенское, 4 — Лучаканское, 5 —

Огонер-Юряхское, 6 — Куранахское; Среднеоленекская группа (2): 7 — Западно-Укукитское, 8 — Мунское, 9 — Чомурдахское, 10 — Восточно-Укукитское; Нижнеоленекская группа (3): 11 — Орто-Ыаргихское, 12 — Мерчимденское, 13 — Молодинское, 14 — Толуокское, 15 — Куойское.

значений. Для Ары-Мастахского поля на юге типичны максимальные значения градиента, его величина к северу уменьшается до средних значений. Огонер-Юряхское и Староречинское кимберлитовые поля расположены в зонах высоких и средних значений градиента. В Среднеоленекской группе Западно-Укукитскому полю свойственны резкие смены значений градиентных зон — от минимальных и средних до максимальных величин. Мунское и Восточно-Укукитское кимберлитовые поля расположены в зоне минимальных значений градиента скоростей новейших вертикальных тектонических движений.

Для *Вилуйского* района, который объединяет Далдыно-Алакитскую (16, 17), Малоботуобинскую (Мирнинскую) (18) группы кимберлитовых полей, характерна более высокая степень плотности разломов (см. рис. 6, б). Зоны максимальных и высоких величин охватывают здесь большую площадь, расположенную в областях динамического влияния региональных разломов. Малоботуобинская (Мирнинская) кимберлитовая группа оконтурена изометричным субдолготным максимумом высоких значений плотности разломов в центре и на западе. Для кимберлитовых полей Далдыно-Алакитской группы типичен значительный разброс плотностных величин. Малоботуобинское поле на севере имеет зону высоких значений плотности разломов, а к югу их величины понижаются. На юге Алакитского кимберлитового поля фиксируется плотностный максимум, который к северу уменьшается до средних значений. Однородностью тектонической трещиноватости отличается Далдынское поле, в нем преобладают средние плотностные величины с незначительным увеличением значений плотности разломов к востоку.

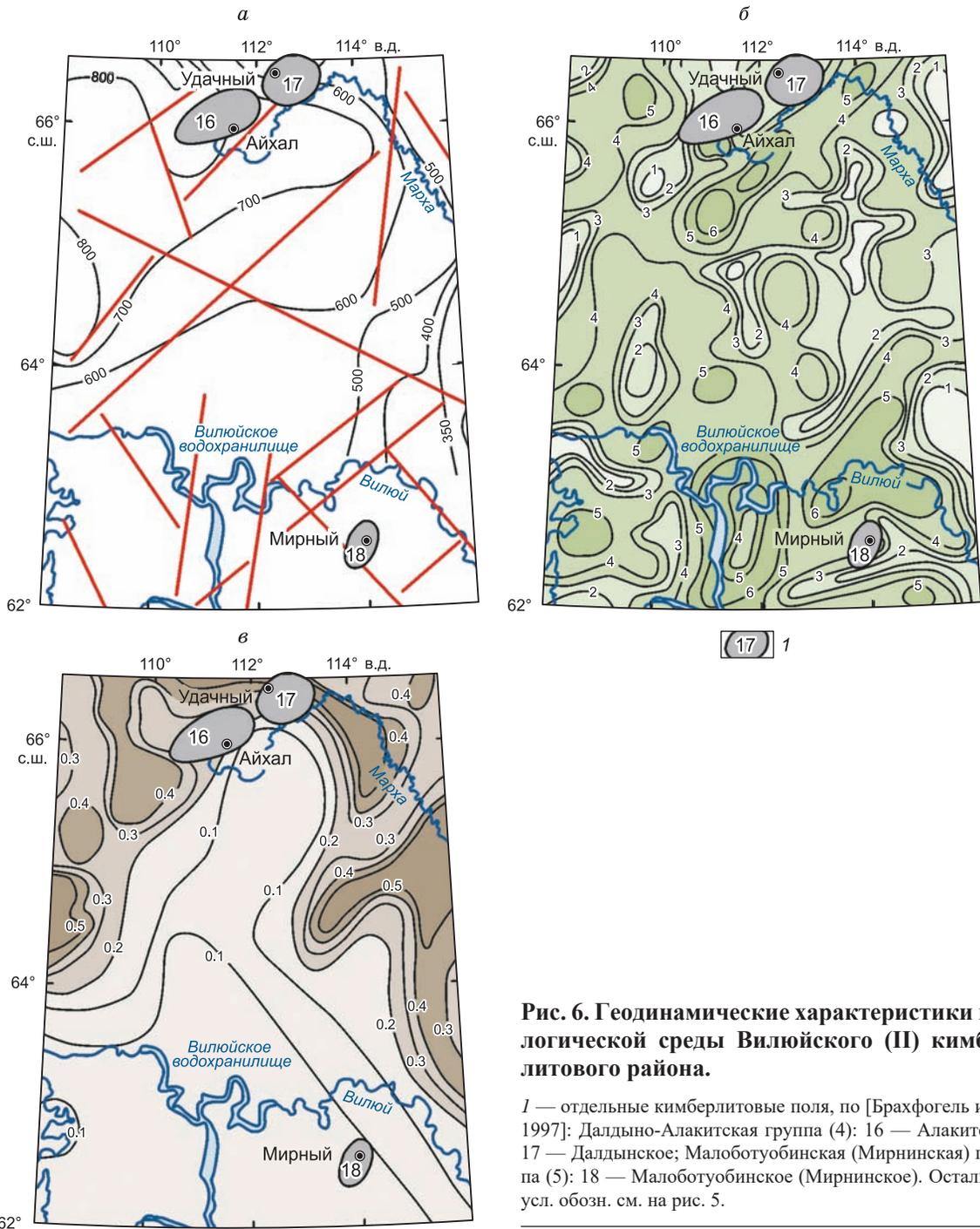


Рис. 6. Геодинамические характеристики геологической среды Вилуйского (II) кимберлитового района.

1 — отдельные кимберлитовые поля, по [Брахфогель и др., 1997]: Далдыно-Алаkitская группа (4): 16 — Алаkitское, 17 — Далдынское; Малообутобинская (Мирнинская) группа (5): 18 — Малообутобинское (Мирнинское). Остальные усл. обозн. см. на рис. 5.

Накынская группа кимберлитовых полей (6, см. рис. 1, 2) обладает сходными характеристиками с кимберлитовыми полями Далдыно-Алаkitской группы.

Вилуйский кимберлитовый район резко отличается от Оленекского низкой степенью контрастности неотектонических движений (см. рис. 6, в). Здесь преобладают зоны минимальных и средних значений градиента скоростей новейших вертикальных тектонических движений, а зоны с максимальными и высокими показателями имеют локальное распространение на севере, западе и востоке. Малообутобинское (Мирнинское) поле полностью размещается в пределах области минимальных значений градиентов, что согласуется со слабой расчлененностью его рельефа. Территория кимберлитовых полей Далдыно-Алаkitской группы характеризуется различными по интенсивности градиентными зонами. Малообутобинское поле однородно и расположено в области минимальных величин градиента. Алаkitское и Далдынское кимберлитовые поля более дифференцированы в градиентном отношении. Значения градиента скоростей здесь увеличиваются с юга на север от минимальных величин до максимальных.

ных. Для Накынской группы кимберлитовых полей типичны максимальные значения градиента скоростей новейших вертикальных тектонических движений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

При оценке потенциальной экологической опасности групп кимберлитовых полей Оленекского и Вилюйского районов мы пользовались расчетными показателями как факторного анализа (плотность разломов и градиенты новейших вертикальных тектонических движений (см. рис. 5, 6)), так и абсолютными величинами других геодинамических характеристик активизации новейших структур (геодинамическая активность, скорость современных вертикальных тектонических движений, интенсивность сейсмической активности в баллах (см. рис. 1, 2)). В зависимости от полученных значений геодинамических показателей геологической среды нами оценена степень экологической опасности отдельных групп кимберлитовых полей, согласно критериям оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 30 ноября 1992 г. [<http://docs.cntd.ru/document/901797511>]. В данном руководстве указывается, что геодинамические показатели деформации геологической среды с экологическими последствиями могут быть представлены в форме интенсивности и масштаба проявления современного напряженно-деформированного состояния верхних частей литосферы. Эти показатели

Геодинамические характеристики новейших структур Оленекского и Вилюйского районов Якутской кимберлитовой провинции

№ п/п	Кимберлитовое поле	P	Grad V	v_m	C	J	Экологическая обстановка
Оленекский кимберлитовый район (I)							
	Куонапская группа (1)	2—5	0.1— ≥ 0.5	0—7	1	о	Относительно удовлетворительная
1	Староречинское	4	0.3—0.4	0—2	1	5	»
2	Ары-Мастахское	4—5	0.2—0.4	0	1	5	»
3	Дюкенское	4	0.2—0.5	0—2	1	5	»
4	Лучаханское	3—4	≥ 0.5	2	1	5	»
5	Огонер-Юряхское	3—4	0.1—0.4	4	1	5	»
6	Куранахское	2—4	0.4—0.5	6—7	1	5	»
	Среднеоленекская группа (2)	1—5	$\leq 0.1—0.5$	2—6	1	5	Относительно удовлетворительная
7	Западно-Укукитское	2—4	0.2—0.5	4—6	1	5	»
8	Мунское	1—2	≤ 0.1	2—4	1	5	»
9	Чомурдахское	4—5	0.1—0.4	4—6	1	5	»
10	Восточно-Укукитское	4—5	≤ 0.1	4	1	5	»
	Нижнеоленекская группа (3)	1—4	0.1—0.5	0—6	1—3	5—7	Напряженная
11	Орто-Ыаргихское	2—4	0.1—0.3	4—6	1	5	»
12	Мерчимденское	2—3	0.3—0.4	2—4	1	5—6	»
13	Молодинское	1—2	0.4—0.5	2—4	2	6—7	»
14	Толуокское	1—4	0.3—0.4	2—6	2—3	6—7	»
15	Куойкское	2—4	0.2—0.3	0—2	2	7	»
Вилюйский кимберлитовый район (II)							
	Далдыно-Алакитская группа (4)	2—5	0.1—0.5	6—8	1	5	Относительно удовлетворительная
16	Алакитское	2—5	0.1—0.3	6—8	1	5	»
17	Далдынское	2—4	0.1—0.5	8	1	5	»
	Малоботубинская группа (5)	3—5	≤ 0.1	0...—4	3	5	Напряженная
18	Мирнинское	3—5	≤ 0.1	0...—4	3	5	»

Примечание. P — плотность разломов, Grad V — градиенты скоростей новейших вертикальных тектонических движений (10^{-8} год $^{-1}$), v_m — скорость современных вертикальных тектонических движений (мм/год), C — класс геодинамической активности, J — интенсивность сотрясений в баллах по шкале MSK-64, по [Карта..., 2015]. Нумерация районов и групп кимберлитовых полей соответствует рис. 1, 2. Нумерация отдельных кимберлитовых полей соответствует рис. 5, 6.

определяются параметрами критических скоростей деформации и масштабом ожидаемого сейсмического эффекта. В документе разработана шкала оценки экологической обстановки территорий (относительно удовлетворительная, напряженная, критическая, катастрофическая (или зона экологического бедствия)), которой мы пользовались. Нами составлена результирующая таблица, где отражены все анализируемые факторы активизации новейших структур и оценена степень экологической опасности.

Оленекский район расположен в зоне контакта тектонических структур Анабарского щита и одноименной антеклизы. Он находится в дифференцированном поле общих показателей геодинамической активности новейших структур (см. таблицу). Практически все кимберлитовые поля расположены в зонах со значительным разбросом плотности разломов, градиентов скоростей современных и новейших вертикальных тектонических движений (см. рис. 2, 5), низких и умеренных значений геодинамической активности (см. рис. 1). В его пределах территории Куонапской и Среднеоленекской кимберлитовых групп могут оцениваться относительно удовлетворительной экологической обстановкой. По рангу неотектонического районирования кимберлитовые поля этих групп расположены в морфоструктурных областях с незначительными амплитудами положительных неотектонических движений (см. рис. 5, а). Часть кимберлитовых полей Куонапской и Среднеоленекской кимберлитовых групп, находящихся в зонах максимальных и средних значений геодинамических характеристик факторного анализа (см. рис. 5, б, в), а также расположенные в высокоградиентных зонах скоростей современных вертикальных тектонических движений (см. рис. 2), могут быть отнесены к областям структурно-динамической неустойчивости.

Нижнеоленекская группа кимберлитовых тел данного района приближена к зонам динамического влияния региональных разломов краевых швов Сибирской платформы, которые характеризуются повышенной степенью тектонической трещиноватости и сейсмической активности (см. рис. 1, 2). Здесь отмечены высокие значения теплового потока и зарегистрирован ряд землетрясений слабого и среднего уровня ($M_w = 4.0—5.7$). Сеймотектоническая реактивизация краевых швов Верхоянского складчатонадвигового пояса может оказывать динамическое влияние на смежные участки Сибирской платформы, где расположены кимберлитовые поля Нижнеоленекской группы. С учетом этого экологическая ситуация оценивается здесь как напряженная. Томторское месторождение редкоземельных элементов, которое находится между Куонапской и Нижнеоленекской группами кимберлитовых тел, характеризуется повышенными значениями геодинамической активности новейших структур (см. рис. 1, 2) и сходной степенью экологической опасности.

Вилуйский район практически весь расположен в зонах низкой и умеренной геодинамической активности новейших структур (см. рис. 1). По периметру он оконтурен изометричными линиями максимальных и высоких значений величин плотности разломов (см. рис. 6, а). Учитывая данный фактор, его структурно-динамическая обстановка в целом оценивается как напряженная. По второму фактору (градиент скоростей новейших вертикальных тектонических движений) Далдыно-Алакитская группа кимберлитовых полей находится в высокоградиентной зоне перехода от минимальных значений к максимальным, а Малоботуобинская группа приурочена к зоне минимальных значений градиента (см. рис. 6, б). Необходимо учитывать факт расположения северного участка района (Далдыно-Алакитская группа) в зоне высоких значений скоростей современных вертикальных тектонических движений, а южного (Малоботуобинская группа) — в зоне отрицательных значений (см. рис. 2). Совместное рассмотрение этих показателей позволяет дать общую экологическую оценку данного района как относительно удовлетворительную с возможным переходом в напряженную (Малоботуобинская группа), что обусловлено близостью южной кимберлитовой группы к сейсмоактивным структурам периферийной зоны Байкало-Станового сейсмического пояса.

Согласно [Карта..., 2015], территория Якутской кимберлитовой провинции отнесена к сеймоопасной области с интенсивностью сотрясений в 5—7 баллов. Поля деформаций сеймотектонических зон на территории кимберлитовых районов сформированы в соответствии с динамикой фронтальных блоков зон коллизии: Лено-Таймырской — на севере (Оленекский кимберлитовый район) и Байкало-Становой — на юге (Вилуйский кимберлитовый район). Помимо местных сейсмических событий ($M_w = 4.0—5.7$), данный регион может испытывать также транзитные воздействия от сильных землетрясений из соседних сейсмических поясов. Кроме того, в районе Вилуйского водохранилища не исключено появление «наведенной сейсмичности», когда под влиянием водной линзы водохранилища может увеличиваться давление на нижележащие горные породы. В таких случаях изменяется равновесный тектонический баланс с ответной реакцией геологической среды в виде подземных толчков, что на порядок увеличивает уровень сейсмической опасности. В мировой практике гидросооружений зафиксированы подобные явления. Возникновение в этом районе землетрясений даже средней интенсивности (6—7 баллов) может привести к экологическим последствиям значительных масштабов. На изменение уровня сейсмической активности могут также влиять и горные работы, сопровождаемые крупными взрывами в карьерах алмазодобычи. Оценка геодинамических характеристик геологической среды по отдельным факторам для групп кимберлитовых тел Оленекского и Вилуйского районов Якутской ким-

берлитовой провинции района дает лишь приближенные результаты. Необходим анализ многолетних инструментальных наблюдений за сейсмической обстановкой данных объектов и проведение крупномасштабных геодинамических исследований.

ВЫВОДЫ

Сеймотектонические исследования, направленные на установление степени геодинамической активности новейших структур Сибирского кратона и оценку экологической обстановки Оленекского и Вилюйского районов Якутской алмазоносной провинции, позволили сделать следующие выводы:

1. Количественный анализ геодинамических характеристик геологической среды, проведенный для отдельных кимберлитовых полей Оленекского и Вилюйского районов, обосновал значимость используемых параметров как проявлений единого процесса накопления и разрядки напряжений в земной коре.

2. Зоны реактивизации краевых швов и фронтальные сегменты Верхоянского и Байкало-Патомского складчато-надвиговых поясов оказывают динамическое влияние на стиль тектонических деформаций и сейсмическую активизацию смежных участков Якутской кимберлитовой провинции Сибирской платформы.

3. Проведенные исследования позволили дифференцировать отдельные группы кимберлитовых полей Оленекского и Вилюйского районов по степени потенциальной сейсмической опасности и экологического риска.

Данное научное исследование проведено при поддержке РФФИ (грант 19-05-00062 «Динамика новейших структур континентально-шельфовой зоны северо-восточного сектора Российской Арктики»).

ЛИТЕРАТУРА

Артюшков Е.В. Резкое размягчение континентальной литосферы как условие проявления быстрых и крупномасштабных тектонических движений // Геотектоника, 2003, № 2, с. 39—56.

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. Т. 1. М., ГЕОС, 2018, с. 11—14.

Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск, Наука, 1991, 194 с.

Бочаров Г.В., Гусев Г.С., Есипова Л.В., Спектор В.Б. Карта современных движений территории Якутской АССР // Геотектоника, 1982, № 3, с. 60—63.

Брахфогель Ф.Ф., Зайцев А.И., Шамшина Э.А. Возраст кимберлитовых магматитов — основа прогнозирования алмазоносности территорий // Отечественная геология, 1997, № 9, с. 20—24.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М., Наука, 1975, 535 с.

Гусев Г.С., Петров А.Ф., Фрадкин Г.С. Структура и эволюция земной коры Якутии. М., Наука, 1985, 248 с.

Гусев Г.С., Межеловский Н.В., Имаева Л.П. Тектонические (геодинамические) процессы и обстановки // Тектонический кодекс России. М., ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2016, с. 59—78.

Дучков А.Д., Соколова Л.С. Термическая структура литосферы Сибирской платформы // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (2), с. 494—503.

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). 2015, <http://maps.nrcgit.ru/geoterm/map.ru>.

Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сеймотектоника Якутии. М., ГЕОС, 2000, 227 с.

Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М., Слепцов С.В. Геодинамические показатели активности земной коры восточной части Сибирской платформы // Отечественная геология, 2005, № 5, с. 88—91.

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.

Имаева Л.П., Имаев В.С., Козьмин Б.М. Сеймотектоническая активизация новейших структур Сибирского кратона // Геотектоника, 2018, № 6, с. 36—54, DOI: 10.1134/S0016853X18060036.

Карта сеймотектоники Восточной Сибири. М-б 1 : 4 000 000 / Под ред. Г.С. Гусева, Л.П. Имаевой, И.И. Колодезникова. 2015, DOI: 10.2205/ESDB-VONZ-125-map. http://neotec.ginras.ru/neomaps/M080_Siberia-E_2015_Seismotectonics.jpg.

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 докладов Международной конференции (30—31 мая—1 июня 2006 г. Москва, ИГЕМ РАН). М., ГЕОС, 2006, с. 6—9.

Мокшанцев К.Б., Гусев Г.С., Петров А.Ф. Геологические критерии сейсмичности // Сейсмическое районирование Якутии и сопредельных территорий. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1975, с. 47—63.

Николаев П.Н. Количественная оценка достоверности и значимости геологических критериев сейсмичности // Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек. М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, № 7, с. 52—65.

Никонов А.А. Голоценовые и современные движения земной коры (геолого-геоморфологические и сейсмотектонические вопросы) М., Наука, 1977, 240 с.

Парфенов Л.М., Оксман В.С., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Третьяков Ф.Ф., Трунилина В.А., Дейкуненко А.В. Коллаж террейнов Верхояно-Колымской орогенной области // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М., МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001, с. 199—254.

Прокопьев А.В., Дейкуненко А.В. Деформационные структуры складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М., МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001, с. 156—198.

Прокопьев А.В., Парфенов Л.М., Томшин М.Д., Колодезников И.И. Чехол Сибирской платформы и смежных складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М., МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001, с. 113—155.

Сейсмотектоника северо-восточного сектора Российской Арктики / Под ред. Л.П. Имаевой, И.И. Колодезникова. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2017, 136 с.

Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф. Фундамент Северо-Азиатского кратона. Алдано-Становой щит // Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия). М., МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001, с. 81—104.

Трифонов В.Г. Неотектоника Евразии. М., Научный мир, 1999, 252 с.

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.

Imaeva L.P., Gusev G.S., Imaev V.S., Mel'nikova V.I. Neotectonic activity and parameters of seismotectonic deformations of seismic belts in the Northeast Asia // Asian Earth Sci., 2017, v. 148, p. 254—264, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseae.2017.09.007>.

*Рекомендована к печати 31 января 2020 г.
И.С. Новиковым*

*Поступила в редакцию 6 мая 2019 г.,
после доработки — 10 января 2020 г.*