



PROBABLE EARTHQUAKE FOCAL ZONES SOUTHEAST OF KRASNOYARSK

V.I. German , O.P. Smekalin , A.Yu. Eskin , O.V. Belousov

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. This study investigates seismicity and seismically active structures of the northwestern Eastern Sayan. The relevance of the study stems from the need to reassess seismic potential of these structures after their associated $M_w=5.5$ earthquake of 2000 and the subsequent discovery of a paleoseismic dislocation in the region which is still poorly known. New data were obtained through field surveys, electrical resistivity surveys, and analysis of previously unused materials from regional deep seismic profiles. These data were used to analyze tectonics, geological structure and morphostructural features of the area in relation to seismicity. The results indicate that the areas with the highest seismic potential are the Kingash and Kiyai-Okler faults branching off from the Iya-Kan fault, whose northwestern termination extends into the suburbs of Krasnoyarsk. The Kingash and Kiyai-Okler faults are well-defined and control the northeastern margin of the Meso-Cenozoic Sayan-Partizansk basin. The study in linear dislocation zones of these faults focused on seismogeological field reconnaissance and geophysical survey. Analysis of the obtained results and geological-geophysical data from published literature suggests that the Mana trough serves as a natural northwest-trending boundary for the seismogenic structures on the northeastern slope of the Eastern Sayan. The study demonstrates that the Main Sayan and Eastern Sayan faults do not pose a significant seismic hazard to Krasnoyarsk. The practical significance of the research results lies in refining the structure of earthquake source zones southeast of Krasnoyarsk and resolving contradictions in regional seismicity assessments on General Seismic Zoning (GSZ) maps for recent decades. The GSZ maps may show the Kingash and Kiyai-Okler faults as a single earthquake source zone confined to the Iya-Kan fault system. The potential maximum magnitude of this source zone is estimated at $M_{max}=7.5$ along extension. The source-related maximum possible intensity in Krasnoyarsk may reach 7.3 points on the MSK-64 scale.

KEYWORDS: Kiyai-Okler fault; Kingash fault; Sayan-Partizansk basin; Eastern Sayan; shallow geophysics; seismicity; seismic zoning; Krasnoyarsk

FUNDING: The work was conducted using equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust SB RUS (grant No. 075-15-2021-682).



EDN: OLVCAK

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Victor I. German, german3v@yandex.ru

Received: November 25, 2025

Revised: March 6, 2026

Accepted: March 13, 2026

FOR CITATION: German V.I., Smekalin O.P., Eskin A.Yu., Belousov O.V., 2026. Probable Earthquake Focal Zones Southeast of Krasnoyarsk. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (2), 0890. doi:10.5800/GT-2026-17-2-0890

ВЕРОЯТНЫЕ ОЧАГОВЫЕ ЗОНЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ К ЮГО-ВОСТОКУ ОТ г. КРАСНОЯРСКА

В.И. Герман, О.П. Смекалин, А.Ю. Ескин, О.В. Белоусов

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

АННОТАЦИЯ. В работе исследуются сейсмичность и сейсмоактивные структуры северо-запада Восточного Саяна. Актуальность работы связана с необходимостью переоценки их сейсмического потенциала после приуроченного к ним землетрясения 2000 г. с $M_w=5.5$ и последующего обнаружения палеосейсмодислокации в условиях сохраняющейся слабой изученности территории. Для получения новых данных были выполнены полевые обследования, электроразведочные работы, рассмотрены не использованные ранее материалы по региональным глубинным профилям. С их учетом был проведен анализ тектоники, геологического строения, морфоструктурных особенностей территории и их связи с сейсмичностью. Он показал, что наибольшим сейсмическим потенциалом обладают Кингашский и Кияй-Оклерский разломы, оперяющие Ийско-Канский разлом, северо-западное окончание которого приходится на пригороды Красноярск. Кингашский и Кияй-Оклерский разломы отчетливо выражены в рельефе и контролируют северо-восточный борт мезокайнозойской Саяно-Партизанской впадины. В зонах линейных дислокаций этих разломов выполнены сейсмогеологические маршрутные и геофизические работы. В результате анализа выполненных работ и литературных геолого-геофизических данных установлено, в частности, что Манский прогиб является естественным ограничением в северо-западном направлении сейсмогенерирующих структур северо-восточного склона Восточного Саяна. Показано, что Главный Саянский и Восточно-Саянский разломы не представляют значительной опасности для Красноярск. Практическая значимость результатов исследований заключается в уточнении строения зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) к юго-востоку от г. Красноярск и преодолении противоречий в оценке сейсмичности территорий на картах общего сейсмического районирования (ОСР) последних десятилетий. На картах ОСР Кингашский и Кияй-Оклерский разломы могут быть представлены единой зоной ВОЗ, приуроченной к системе Канских разломов. Предельный магнитудный потенциал зоны оценен на уровне $M_{max}=7.5$ по ее протяженности. Максимальная интенсивность в г. Красноярск от данной зоны ВОЗ может составить 7.3 балла по шкале MSK-64.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Кияй-Оклерский разлом; Кингашский разлом; Саяно-Партизанская впадина; Восточный Саян; малоглубинная геофизика; сейсмичность; сейсмическое районирование; Красноярск

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена с использованием оборудования и инфраструктуры ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

1. ВВЕДЕНИЕ

Красноярск – крупнейший город России к востоку от Новосибирск: его население превышает 1.2 млн человек. В городе и пригородах сосредоточены стратегически важные промышленные предприятия, обеспечивающие экономическую и оборонную безопасность страны.

Красноярск расположен в зоне смыкания трех крупных тектонических элементов Азиатского материка: Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской складчатой области. Для оценки сейсмической опасности в районе города необходимо определить степень активности указанных тектонических структур на границах их сочленения. При этом наибольшая активность наблюдается в зоне контакта Сибирской платформы и Алтае-Саянской складчатой области. Основным структурным швом между ними является Главный Саянский разлом, протянувшийся вдоль всего Восточного Саяна. Его юго-восточный фланг, примыкающий к Байкальской рифтовой системе, обладает высоким сейсмическим потенциалом ($M=8.0-8.2$). Это подтверждается наличием Восточно-Саянской палеосейсмодислокации протяженностью не менее 60 км

(до 95 км) с амплитудой разового смещения 8.3 м [Chipizubov, Smekalin, 1999]. При этом за период инструментальных наблюдений наиболее сильным в зоне Главного Саянского разлома стало Быстринское землетрясение с $M_w=5.4-5.5$ [Bornyakov et al., 2021; Gileva et al., 2020].

До 2000 г. Главный Саянский разлом за исключением отрезка, вскрытого Восточно-Саянской дислокацией, характеризовался низким магнитудным потенциалом в связи с приуроченностью к нему эпицентров только слабых землетрясений и отсутствием признаков сейсмогенного обновления (рис. 1). Аналогично малоактивными считались и иные структуры северо-западной части Алтае-Саянской складчатой области и прилегающих районов Сибирской платформы, включая Ийско-Канский разлом, северо-западное окончание которого проходит через пригороды Красноярск, а также оперяющие его разломы: Кингашский и Кияй-Оклерский (рис. 1), субпараллельные северо-восточной границе Канской глыбы.

Представления о низком магнитудном потенциале разломов, проходящих вблизи Красноярск, легли в основу модели очаговой сейсмичности, используемой

при расчете карт общего сейсмического районирования ОСР-97 [Ulomov, Shumilina, 1999]. Согласно этой модели в радиусе 110 км от Красноярска не могут возникнуть землетрясения с магнитудой $M > 5.5$, а на удалении 310 км от него – с $M > 6.0$. Интенсивность сотрясений для Красноярска по картам ОСР-97 для средних периодов повторяемости 500, 1000 и 5000 лет (карты А, В и С) составляет соответственно 6, 6 и 8 баллов по шкале MSK-64. Карты ОСР-2015, являющиеся в настоящее время нормативными, на юге Сибири полностью повторяют карты ОСР-97.

Однако с 2000 г. было накоплено много новых данных, свидетельствующих о необходимости пересмотра параметров сейсмогенерирующих структур в районе Красноярска, которые описаны далее. В результате был предложен целый ряд сеймотектонических моделей [Geological-Geophysical Study..., 2001; Ruzhich et al., 2002a; Sibgatulin et al., 2003; Ulomov, 2013; Imaev et al., 2015; Ulomov et al., 2016; Seelev et al., 2018; Updating..., 2022], в которых тем или иным образом учтена новая информация о сеймотектонике. Все полученные модели очень сильно различаются между собой [Belousov et al., 2023]. Отсутствие надежной единообразной модели связано с очевидной недостаточностью изученности района в отношении его сейсмичности. Наиболее опасный для Красноярска вариант представлен в модели ОСР-2016 [Ulomov et al., 2016], согласно которой линеамент с максимальной магнитудой 7.5, проходящий вдоль Кингашского и Ийско-Оклерского разломов и далее, подходит к Красноярску на расстояние менее 35 км.

При всех различиях предложенных сеймотектонических моделей их объединяет то, что источники максимальных возможных сейсмических воздействий в Красноярске располагаются к юго-востоку от него и

приурочены к Главному Саянскому и Ийско-Канскому разломам и входящим в зоны их динамического воздействия оперяющим разломам, а также блокам, контролируемым этими разломами.

Целью настоящей работы являлось получение новых данных и их совместный комплексный анализ с известными сведениями для уточнения параметров зон ВОЗ к юго-востоку от Красноярска, играющих ключевую роль в оценке сейсмической опасности.

2. ДАННЫЕ, СВИДЕТЕЛЬСТВУЮЩИЕ О НЕОБХОДИМОСТИ ПЕРЕСМОТРА ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ СТРУКТУР В РАЙОНЕ КРАСНОЯРСКА

На проблемы оценки сейсмичности Красноярска и его окрестностей обратили внимание после возникновения Караганского (Агинского) [Ruzhich et al., 2002a; Emanov et al., 2006] землетрясения 27 октября 2000 г. с $M_s = 5.6$ и интенсивностью 7 баллов [Geological-Geophysical Study..., 2001; Ruzhich et al., 2002a; Updating..., 2002; Emanov et al., 2006] с эпицентром в 200 км к юго-востоку от города. Из активных разломов ближе других к инструментально определенному эпицентру расположен Главный Саянский разлом, эпицентрального расстояния до которого не превышает 9 км. При макросейсмическом обследовании этого землетрясения в зоне Кингашского разлома у западной окраины д. Малиновки С.Г. Аржанниковым был обнаружен линейный уступ (рис. 2). Его сейсмогенность подтверждена морфометрией и тренчингом, а магнитуда палеоземлетрясения, образовавшего уступ, оценена значением $M = 8$ [Arzhannikov et al., 2004]. Для участка разлома восточнее р. Кан и ряда участков Кияй-Оклерского разлома на аэрофотоснимках также были выделены признаки сейсмогенности [Besstrashnov et al., 2010].



Рис. 2. Сейсмогенный уступ Малиновской сейсмодислокации (фото С.Г. Аржанникова, 2000 г.). Вид на север-северо-восток, простирание уступа 325° (северо-западное), координаты: 55.14725° с.ш., 94.75615° в.д.

Fig. 2. The seismicogenic scarp of the Malinovka seismic dislocation (photo by S.G. Arzhannikov, 2000). View toward the north-north-east; the scarp strike is 325° (northwest), coordinates: 55.14725° N, 94.75615° E.

Отметим, что в базе данных активных разломов Евразии (AFEAD) [Zelenin et al., 2022] большая часть Кингашского и Кияй-Оклерского разломов охарактеризована высокой степенью достоверности установления проявлений активности.

У восточной границы Красноярска, рядом с с. Бархатово, С.Г. Аржанниковым и А.В. Чипизубовым в 2009 г. обнаружены дислокация и полторакилометровый в поперечнике оползень. Но их возможное сейсмическое происхождение требует подтверждений. Такого же подтверждения требует природа возникновения структуры, схожей с оползнем, находящейся в районе пос. Береть в 30 км к юго-востоку от Красноярска, обнаруженной А.Л. Стромом по результатам дешифрирования космоснимков [Besstrashnov et al., 2010]. Новые данные по ней приведены в работе [Belousov et al., 2023] и в описании ниже.

В настоящей работе представлены новые результаты дополнительных геолого-геофизических исследований зон Кияй-Оклерского и Кингашского разломов, сопряженных с мезозойской Саяно-Партизанской впадиной (см. рис. 1), – основных структур, генерирующих очаги землетрясений, являющихся источниками максимально возможных сотрясений на территории Красноярска. В ней также проведен анализ сейсмической активности и геологического строения района с привлечением результатов региональных геофизических работ, не использованных ранее.

3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выявления и оценки параметров очаговых зон был проведен сбор и совместный анализ данных геологической съемки, представлений о тектоническом и глубинном строении исследуемой территории, ее геологической истории, а также сведений о геофизических полях, исторической и инструментально зарегистрированной сейсмичности.

В ходе работ был сформирован сводный унифицированный каталог землетрясений до 2023 г. включительно, приведенный к магнитуде M_s . Он основан на данных Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН, Красноярского научно-исследовательского института геологии и минерального сырья (КНИИГиМС), большая часть которых опубликована в сборниках «Землетрясения в СССР», «Землетрясения Северной Евразии», «Землетрясения России». Сведения о землетрясениях до 1962 г. были взяты из Специализированного каталога землетрясений Северной Евразии (СКЗ) [Ulomov, Medvedeva, 2016], созданного при разработке комплекта карт ОСР-2016.

Дополнительно в 2022–2023 гг. после предварительного анализа цифровых моделей рельефа, дешифрирования данных дистанционного зондирования авторами статьи были проведены полевые обследования в районе Саяно-Партизанской впадины вдоль трассы прохождения Кияй-Оклерского и Кингашского разломов, а также вблизи предположительно сейсмогенных структур у с. Бархатово и пос. Береть. Поперек уступов

указанных выше разломов были пройдены шесть малоглубинных профилей вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). При анализе также использовались результаты электроразведочных работ, выполненных комплексом методов магнитотеллурического зондирования (АМТЗ, МТЗ, ГМТЗ) вдоль регионального маршрута ст. Камарчага – д. Черная Речка протяженностью 240 км, а также четырех маршрутов в районе возникновения Караганского землетрясения и уступа у д. Малиновка. Указанные работы были проведены специалистами КНИИГиМС в 2001–2005 гг.

Геоэлектрические разрезы по последним четырем маршрутам были построены для трех уровней глубины: 0.5, 5 и 50 км [Geological-Geophysical Study..., 2005]. Малоглубинный разрез (до 0.5 км) проанализирован в исходной детализации. В более глубоких моделях (5 и 50 км) приповерхностные части разреза заменялись эквивалентными слоями с осредненными сопротивлениями, в то время как целевые интервалы (0.5–5.0 км и 5–50 км соответственно) рассматривались без упрощений.

Работы методом ВЭЗ выполнялись аппаратурой «Электротест-РВ» (НТК «Диоген», Россия), позволяющей регулировать рабочий ток и проводить электроразведочные работы методами сопротивлений. Использовалась симметричная установка, состоящая из четырех электродов – двух питающих АВ и двух приемных MN. Разносы питающей линии АВ/2 составляли: 1.5; 3.0; 4.5; 6.0; 9.0; 15; 25; 40; 65; 100; 150 м, что позволило изучать геоэлектрический разрез до глубины 40–60 м. Длина приемной линии MN/2 составляла 1.0 м. Расстояние между точками ВЭЗ составляло 50 м. Число точек ВЭЗ на каждом профиле было равно 5–6.

Полевые работы методом магнитотеллурического зондирования проводились электроразведочными станциями АКФ-4 и SGS-E с использованием электрических диполей и индукционных датчиков. Четырехканальная станция АКФ-4 (изготовитель – НПО «Рудгеофизика», г. Санкт-Петербург) – портативная аудиоманнитотеллурическая станция – предназначена для измерений характеристик естественных и искусственных электромагнитных полей в диапазоне 1–3200 Гц, обработки данных измерений в реальном времени и регистрации результатов обработки. Шестиканальная станция SGS-E (изготовитель – «СибГеоСейс», г. Новосибирск) предназначена для регистрации вариаций электромагнитного поля Земли при проведении работ методом магнитотеллурического зондирования либо другими методами электромагнитных зондирований без использования внешней синхронизации сигнала. По результатам интерпретации изучен геоэлектрический разрез до глубины 200–300 км.

4. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В РАЙОНЕ КРАСНОЯРСКА

Сбор сведений о землетрясениях, произошедших в районе Красноярска и к юго-востоку от него, являлся первым этапом в оценке активности ближайших тектонических структур.

4.1. Исторические землетрясения

Первые сведения о землетрясениях в Красноярском крае содержатся, вероятно, в записках И.Г. Гмелина. На основе опроса жителей Красноярска в ходе своей зимовки в 1739–1740 гг. он писал: «Самое западное место из всех, где, как я узнал, происходили землетрясения, – Красноярск. Но они, должно быть, происходили только в давние времена, поскольку среди молодых людей никто не может вспомнить ни одного землетрясения. Даже те, о которых еще помнят старики, не были настолько сильными, чтобы кого-либо сильно напугать» [Gmelin, 1752; Nikonov, Fleifel, 2014].

Другие известные сведения об исторической сейсмичности рассматриваемой территории обобщены в Специализированном каталоге землетрясений Северной Евразии [Ulomov, Medvedeva, 2016]. Он был составлен и использован при разработке нового комплекта карт ОСР-2016. Важным его отличием от предыдущих каталогов [Mushketov, Orlov, 1893; Savarensky et al., 1962; New Catalog..., 1977] является учет новых данных Н.Д. Жалковского и В.И. Мучной [Zhalkovsky et al., 1992], переопределивших параметры трех из четырех землетрясений рассматриваемого района, приведенных в [New Catalog..., 1977] за период до 1967 г. (табл. 1).

В частности, из каталога была исключена запись о катастрофическом землетрясении в районе Красноярска, отнесенном к 08.08.1806 г. [Perrey, 1849]. Было показано, что запись основывалась на недостоверных сведениях, приведенных в двух французских газетах 1806 г. [Zhalkovsky, Muchnaya, 1993]. В них описывались такие проявления, как «разлив Енисея», разрушение множества зданий, а также появление озера на месте горы. Недостоверность этих сведений показана в найденном ими докладе С.Н. Мамеева – первого руководителя Енисейского губернского управления архивным фондом (сейчас Государственный архив Красноярского края), выводы которого дополнительно были подтверждены материалами из архивов Томска [Zhalkovsky, Muchnaya, 1993; Study..., 1993; Updating..., 2002].

Таблица 1. Параметры известных землетрясений с $M_s \geq 3.5$, произошедших на территории с координатами 53.7–57.0° с.ш.; 91.1–96.4° в.д.

Table 1. Parameters of the known earthquakes with $M_s \geq 3.5$ that occurred in the area with coordinates 53.7–57.0° N; 91.1–96.4° E

Дата	φ , °с.ш.	λ , °в.д.	Магнитуда
12.06.1858	56.00	93.00	4.7
30.08.1892	55.60	95.50	3.9
25.04.1938	55.20	94.60	4.9
27.02.1972	54.72	92.82	3.9
09.08.1972	54.10	94.90	3.7
27.10.2000	54.63	95.09	5.6
08.05.2004	54.77	95.15	4.1
24.03.2009	54.71	93.33	3.7
10.02.2016	54.39	94.26	3.6
24.06.2023	55.13	94.74	3.9

Корректировке подверглась и запись о первом достоверном землетрясении на рассматриваемой территории, относящемся к 10.06.1858 г. Его эпицентр был помещен на территорию Красноярска при сохранении значения магнитуды $M=4.7$, указанного в [New Catalog..., 1977]. В газете «Иркутские губернские ведомости», № 29, 1858 г., А. Шепетковский, живший в Красноярске, описывал проявления землетрясения: «Сдвигания земли были весьма ощутительны; в домах звенела посуда, в иных сами собою растворялись окна и двери. Неожиданность явления навела на некоторых невольный страх, испуганные жители выбегали из домов, однако в зданиях повреждений не произошло; только в одном каменном двухэтажном доме в трех комнатах треснули потолки и две печи». В воспоминаниях других очевидцев землетрясения из Красноярска сведения о повреждении зданий отсутствуют [Orlov, 1873; Komarova, 2016]. Сила данного землетрясения в статье [Zhalkovsky, Muchnaya, 1975], вероятно на основе неполных сведений из работы [Mushketov, Orlov, 1893], оценена в 6 баллов. Однако приведенные выше проявления в Красноярске больше соответствуют 5 баллам. С учетом этого при локализации эпицентра в пределах города оценку магнитуды землетрясения 10.06.1858 г. целесообразно понизить до 4.0.

Еще одним историческим землетрясением является событие 29.08.1892 г. ($M=3.9$), эпицентр которого в каталогах [New Catalog..., 1977; Ulomov, Medvedeva, 2016] располагают в районе с. Ирбейского. Сведения об этом событии противоречивы. Его проявление в с. Ирбейском в газете «Сибирский вестник», № 110, 1892, описывается как «продолжавшееся 3–4 секунды, сопровождаемое весьма незначительным колебанием, затем подземным гулом». В то время как «в окрестностях деревни Юдиной ..., отстоящей от села Ирбейское в 4-х верстах (4–5 км), как объясняют жители, находящиеся на полях, колебание земли было настолько сильное, что многие, пошатываясь, с трудом держались на ногах».

Инструментальные наблюдения на рассматриваемой территории стали возможны после открытия сейсмических станций в Ташкенте (1900 г.), Иркутске (1901 г.), Красноярске (1902 г.) и Екатеринбурге (1906 г.), а также других станций в Байкальском регионе [Earthquakes..., 1961]. К сожалению, в 1908–1909 гг. станция Красноярск была закрыта. Но практически без перерывов действовали сейсмические станции в Иркутске, Екатеринбурге и Ташкенте. В 1911–1913 гг. на них установили сейсмографы конструкции Б.Б. Голицына, позволявшие качественно регистрировать далекие землетрясения [Earthquakes..., 1961]. Считается, что они регистрировали без пропусков землетрясения с магнитудой 5.0 и выше [Masarsky, Gorbunova, 1964].

За период с 1900 по 1967 г. имеются данные только об одном зарегистрированном землетрясении. Оно произошло 25.04.1938 г. (на рис. 1 его эпицентр расположен на границе Саяно-Партизанской впадины). По записям сейсмостанции в Иркутске было установлено, что удаление эпицентра от нее составило приблизительно

800 км [Nikiforov, 1938]. Данное землетрясение также было зарегистрировано станцией в Екатеринбурге с определением вступления поперечной волны. К сожалению, этих данных было недостаточно для надежного определения положения эпицентра. Его координаты, приведенные в каталоге [Ulomov, Medvedeva, 2016], относятся к с. Большой Арбай (табл. 1). Они были определены на основе анализа макросейсмических сведений из работы [Zhalkovsky et al., 1992] и сильно отличаются от координат в работах [Nikiforov, 1938; New Catalog..., 1977; Masarsky, Gorbunova, 1964]. Магнитуда указанного землетрясения принята равной 4.9. Проявления землетрясения так описывались в газете «За сталинские темпы» (с. Агинское), № 36, 1938 г.: «...на всей территории Саянского района в течение 15–18 секунд ощущались сильные подземные толчки. Колебание земли настолько было сильное, что в отдельных квартирах рабочих Арбайской МТС развалились печные трубы и в оконных рамах школы лопнули стекла. В районном центре с. Агинск дрожали стены зданий, окна. Проходящих по улице жителей Агинска качало из стороны в сторону». В статье [Ruzhich et al., 2002a] также отмечалось, что жители с. Орьё тоже помнят о сильных толчках при землетрясении 1938 г., «от которых, в частности, получили повреждения дымовые трубы». Повреждения в с. Орьё, по всей видимости неизвестные при переопределении эпицентра землетрясения 25.04.1938 г., свидетельствуют о целесообразности его смещения на юго-восток.

4.2. Инструментальный период регистрации землетрясений

С 60-х годов XX века началось формирование региональной сейсмологической сети Алтае-Саянского региона (сеть ASRS). С 1999 г. ее дополнила сейсмическая сеть КНИИГиМС (код KRAR), охватывающая территорию центральных и южных районов Красноярского края. Сейсмологические материалы указанных сетей в

данной работе использовались для дополнения каталога и уточнения [Ulomov, Medvedeva, 2016]. Основные параметры сейсмостанций приведены в табл. 2.

Анализ представительности регистрации землетрясений в пределах территории на рис. 1 показывает, что землетрясения с $M_s \geq 5.25$ следует рассматривать в качестве представительных с 1902 г. Надежная регистрация землетрясений с $M_s \geq 2.75$ была обеспечена со второй половины 1962 г., когда начали проводиться региональные сейсмологические наблюдения. После открытия опорной станции «Верх-База» в Хакасии с 1968 г. представительными стали землетрясения с магнитудой $M_s \geq 2.50$. В 1985 г. была запущена сейсмостанция «Мина». Она совместно с другими станциями сети позволила регистрировать без пропуска землетрясения с $M_s \geq 2.00$, схожие оценки представительности данных имеются в работах [Filina, 1999; Emanov et al., 2004]. В период с 2005 г. до середины 2018 г., когда в штатном режиме функционировала сейсмическая сеть КНИИГиМС, состоящая из 8–13 станций [German, Slavsky, 2018], в западной и центральной части территории была обеспечена представительность регистрации сейсмических событий с $M_s \geq 1.50$. Значения магнитуды M_s для большинства землетрясений рассчитывались из энергетического класса согласно зависимостям, полученным в работе [German, 2021]:

$$M_s = 0.584K_{ASRS} - 2.87,$$

где K_{ASRS} – энергетический класс, определенный Алтае-Саянским филиалом ФИЦ ЕГС РАН.

Самым сильным известным сейсмическим событием на рассматриваемой территории стало Караганское (Агинское) землетрясение 27.10.2000 г. с $M_s = 5.6$ (по ФИЦ ЕГС РАН), $M_w = 5.5$ (по GCMT). Землетрясение приурочено к узлу сочленения Манского и Главного Саянского разломов (см. рис. 1). Данное землетрясение имело сбросовый механизм с ориентацией плоскости подвижки, ортогональной по отношению к продольным

Таблица 2. Сведения о ближайших стационарных сейсмических станциях сетей ASRS и KRAR

Table 2. Information about the nearest permanent seismic stations of the ASRS and KRAR networks

Сейсмическая станция	Код сети	Дата открытия/закрытия	φ , °с.ш.	λ , °в.д.
Красноярск	KRAR	12.1999/12.2022	56.012	92.873
Дивногорск	KRAR	12.2001/04.2013	55.956	92.404
Железногорск	ASRS	08.2002	56.265	93.542
Железногорск-2	ASRS	12.2012	56.383	93.767
Железногорск-3	ASRS	12.2012	56.333	93.605
Орешное	KRAR	02.2003/03.2005	55.302	93.666
Зеленогорск	KRAR	04.2005/01.2014	56.119	94.518
Мина	ASRS	07.1985	54.978	94.127
Кутурчин	KRAR	11.2004/11.2016	54.938	94.214
Орьё	KRAR	03.2004/11.2024	55.003	95.109
Тиберкуль	KRAR	08.06.2004/11.2024	53.883	93.744
Казыр	KRAR	08.2001/08.2002	53.746	92.300
Большая Речка	KRAR	02.2005/11.2024	53.038	92.428
Оленья речка	KRAR	08.2002/06.2004	52.807	93.239
Арадан	ASRS	08.1992	52.580	93.428

структурам Восточного Саяна [Emanov et al., 2006]. Его афтершоковая область имеет вытянутую форму со схожим направлением и с некоторым сдвигом на северо-восток [Emanov et al., 2006]. 08.05.2004 г. на краю этой области произошло Кулижинское землетрясение с магнитудой 4.1, удаленное менее чем на 20 км к северо-востоку от эпицентра Караганского землетрясения.

По Караганскому землетрясению были собраны детальные макросейсмические данные более чем в 50 населенных пунктах [Updating..., 2002; Ruzhich et al., 2002a; Emanov et al., 2006]. Максимальные сотрясения от землетрясения в населенных пунктах составили 5–6 баллов. Они наблюдались в с. Малиновка и ближайших к нему селах Большой Арбай, Вознесенка, а также в с. Орье [Updating..., 2002; Ruzhich et al., 2002a; Emanov et al., 2006]. При этом длинная ось изосейст землетрясения была вытянута вдоль основных тектонических структур северо-западной части Восточного Саяна. Следует также отметить, что известные проявления землетрясения 25.04.1938 г. схожи с последствиями Караганского землетрясения.

24.06.2023 г. в 12 км к юго-востоку от с. Агинского было зафиксировано землетрясение с магнитудой $M_s \approx 4.0$. Оно хорошо ощущалось местными жителями.

Все остальные известные землетрясения с магнитудой $M_s \geq 3.5$, произошедшие на рассматриваемой территории в радиусе 270 км от г. Красноярска (см. табл. 1), зафиксированы вдоль юго-западного фаса Восточного Саяна, вблизи прохождения Восточно-Саянского разлома (см. рис. 1). К ним относятся Крольское землетрясение 24.03.2009 г. с $M_s \approx 3.7$ и Котырское землетрясение 10.02.2016 г. с $M_s \approx 3.6$, которые ощущались в Красноярске, а также два землетрясения, произошедшие в 1972 г.: 27.02.1972 г. с $M_s \approx 3.8$ и 09.08.1972 г. с $M_s \approx 3.6$. К сожалению, координаты землетрясений 1972 г. не могли быть определены достаточно надежно в связи с большой удаленностью действующих сейсмостанций (табл. 2).

5. СВЯЗЬ СЕЙСМИЧНОСТИ С ТЕКТОНИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ ТЕРРИТОРИИ

В ближней зоне г. Красноярска (первые сотни километров) эпицентральное поле занимает территорию поднятия Восточного Саяна и прилегающих к основанию его северо-восточного склона равнин Сибирской платформы. В тектоническом отношении территория представлена структурами Алтае-Саянской складчатой области и активизированной окраины Сибирской платформы (см. рис. 1). Большинство инструментально зарегистрированных эпицентров землетрясений лежат в пределах выхода к поверхности цоколя Сибирской платформы. В эпицентральном поле кроме отдельных событий выделяются и области относительно скопления эпицентров. На рассматриваемой территории таких скоплений три. Одно из них полностью находится в пределах Канской глыбы и занимает площадь около 100 км². Облако эпицентров вытянуто в меридиональном направлении. Здесь зарегистрированы

шесть землетрясений с $M_s=2.0-2.5$, два землетрясения с $M_s=2.6-3.5$, одно землетрясение с $M_s=4.1$ 08.05.2004 г. и Караганское землетрясение с $M_s=5.6$.

Территории, подвергшиеся палеозойской седиментационно-магматической активизации, проявляют сейсмическую активность в узких полосах, граничащих со структурами фундамента. На юго-восточной оконечности Агульско-Рыбинской впадины, а также частично на территории Дербинской глыбы, Удинско-Колбинской рифтовой зоны и Ийско-Туманшетского прогиба располагается второе облако относительной концентрации эпицентров (см. рис. 1). Оно занимает территорию площадью около 7 тыс. км², включает более 20 представительных землетрясений с $M_s=2.0-2.5$, 14 землетрясений с $M_s=2.6-3.5$ и 4 землетрясения с $M_s=3.6-4.5$. Центр этого эпицентрального облака тяготеет к зоне смыкания Главного Саянского разлома и Ийско-Канского разлома.

Территория платформы и мезозойских впадин имеет слабую сейсмичность. Для них характерны отдельные эпицентры с магнитудой не более 3.5.

Сейсмичность структур Алтае-Саянской складчатой области в пределах рассматриваемой территории в основном сосредоточена вдоль границы Сибирской платформы, которая здесь проходит по Восточно-Саянскому разлому, отделяющему с юго-запада Дербинскую глыбу. Эпицентры располагаются вдоль этой границы, заходя на территорию складчатой области на расстояние до нескольких десятков километров. Как можно видеть на рис. 1, несколько землетрясений имеют магнитуду до 4.5. Эпицентры равномерно распределены вдоль северо-восточной границы Алтае-Саянской складчатой области и рассматриваются нами как третье эпицентральное скопление.

Особое значение в свете сейсmobезопасности Красноярска имеет Манский перикратонный прогиб – фрагмент чехла Сибирской платформы с отсутствием следов палеозойской и мезозойской тектономагматической активизации. Манский прогиб является наиболее стабильной структурой территории [State Geological Map..., 2008]. На востоке нижнекембрийские образования Манского прогиба по линии Манского разлома граничат с докембрийскими породами Канской глыбы (см. рис. 1). Эта граница явилась естественным препятствием для продвижения в западном направлении зоны сейсмоактивного Кияй-Оклерского разлома, отчетливо выраженного в рельефе сейсмотектоническим уступом лишь в пределах Канской глыбы. Территория Манского прогиба характеризуется слабой сейсмичностью. Представительным здесь является лишь одно землетрясение с $M_s=2.9$.

6. АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ В НОВЕЙШЕЙ СТРУКТУРЕ

Авторами Объяснительной записки к карте N-46, охватывающей большую часть рассматриваемой территории, справедливо отмечено, что «новейшая тектоническая активность территории листа велика, все

структуры ограничены тектоническими уступами разной высоты и подчинены постоянно живущим глубинным и региональным разломам, являются сейсмичными зонами по настоящее время» [State Geological Map..., 2008, с. 160].

6.1. Главный Саянский и Восточно-Саянский разломы

Активизация древних разломов предопределяет наследование новейшими морфоструктурами границ блоков, возраст которых уходит вплоть до протерозоя и архея. Так, Дербинская глыба, ограниченная Главным Саянским и Восточно-Саянским разломами (см. рис. 1), слагает хребты Манского и Канского Белогорья, протягивающиеся вдоль осевой линии Восточного Саяна. Глыба незначительно приподнята над отрогами Восточного Саяна, ее поверхность относительно плоская, с неглубокими врезами речных долин. Глыба представляет собой водораздел между юго-западным и северо-восточным склонами Восточного Саяна. В ее пределах отсутствуют сквозные и antecedentные долины. За пределами глыбы, на склонах Восточного Саяна – в более молодых образованиях Алтае-Саянской складчатой области и активизированных в палеозое территорий Сибирской платформы – рельеф становится значительно контрастнее.

Ограничивающий с юго-запада Дербинскую глыбу сейсмоактивный Восточно-Саянский разлом не вы-

ражен отчетливым уступом в рельефе и в новейшей структуре определяется по смене вершинного, выровненного, рельефа более контрастным склоновым рельефом. В зоне разлома не выявлены признаки сейсмотектонической активизации и, следовательно, можно рассчитывать на максимальную магнитуду землетрясений не более 6.5. Схожая ситуация наблюдается для северо-западного окончания Главного Саянского разлома в пределах 100-километровой зоны вокруг Красноярска, где он также слабо выражен в рельефе. Все ближайшие инструментально зарегистрированные землетрясения с магнитудой $M_s \geq 3.6$ локализованы в юго-западном крыле Восточно-Саянского разлома (см. рис. 1).

Минимальное расстояние до Красноярска от Главного Саянского разлома составляет около 63 км, а от Восточно-Саянского – более 100 км. Согласно уравнению Блейка-Шебалина со средними коэффициентами [Bune, Gorshkov, 1980], при магнитуде землетрясения 6.5 интенсивность сотрясений на территории Красноярска не превысит 6.5 балла по шкале MSK-64.

6.2. Прослеживание Кингашского и Кийяй-Оклерского разломов

Наибольшую опасность в сейсмическом отношении для территории Красноярска представляют сейсмоактивные структуры Канской глыбы. К ним относятся разломы Главный Саянский и Ийско-Канский, а

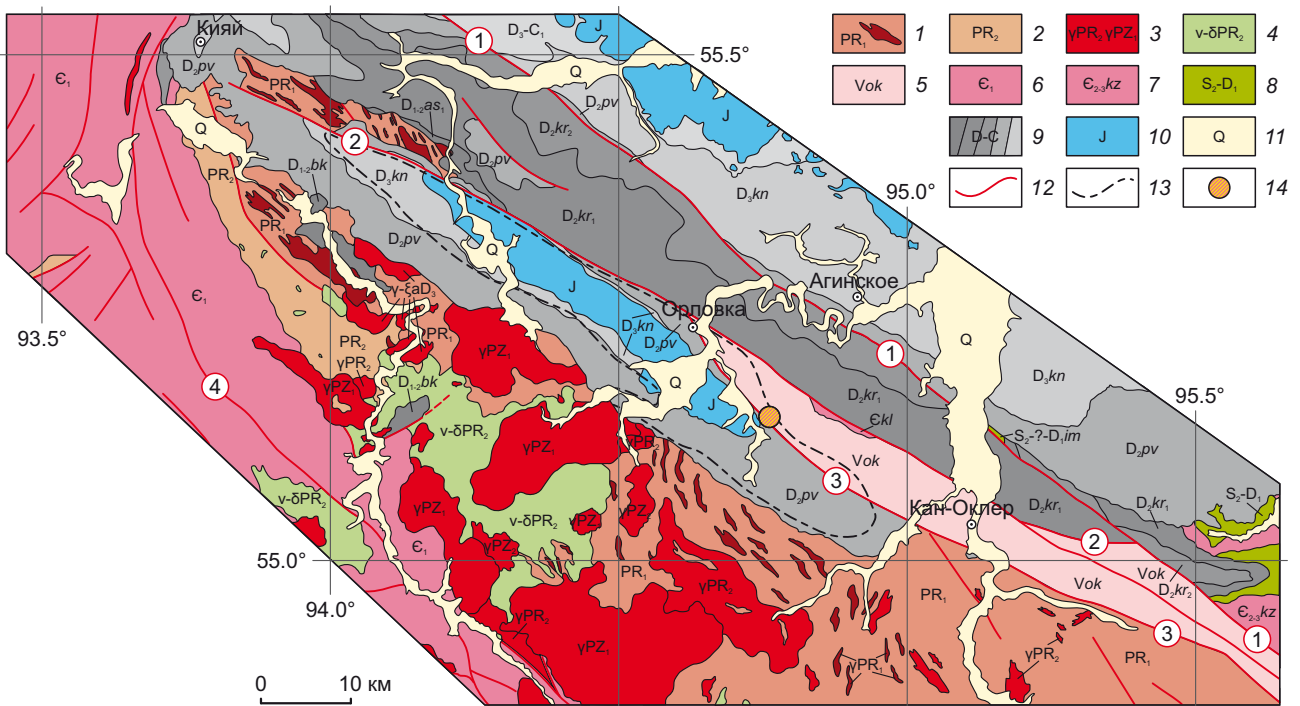


Рис. 3. Геологическая схема окрестностей Саяно-Партизанской впадины (составлена по материалам геологических карт масштаба 1:200000).

1 – гнейсы, амфиболиты и кристаллические сланцы бирюсинской свиты, гнейсограниты и граниты дербинского комплекса; 2 – терригенно-карбонатные и вулканогенные породы верхнего протерозоя; 3 – гранитоиды верхнего протерозоя, нижнего палеозоя и девона; 4 – верхнепротерозойские габбро и диориты; 5 – отложения оклерской свиты венда; 6 – раннекембрийские образования Манского прогиба; 7 – порфириды кизирской свиты; 8 – верхнесилурийские – нижнедевонские вулканы;

9 – терригенные образования девона и карбона; 10 – юрские угленосные отложения; 11 – четвертичные отложения; 12 – разломы (1 – Ийско-Канский, 2 – Кияй-Оклерский, 3 – Кингашский, 4 – Манский); 13 – современные границы Саяно-Партизанской впадины; 14 – Малиновская палеосейсмодислокация.

Fig. 3. Schematic geological map of the Sayan-Partizansk Basin (compiled from geological maps at a scale of 1:200000).

1 – gneisses, amphibolites and crystalline schists of the Biryusa formation; gneiss-granites and granites of the Derbina complex; 2 – Upper Proterozoic terrigenous-carbonate and volcanogenic rocks; 3 – Upper Proterozoic, Lower Paleozoic, and Devonian granitoids; 4 – Upper Proterozoic gabbro and diorites; 5 – Vendian sediments of the Okler formation; 6 – Early Cambrian formations of the Mana trough; 7 – porphyrites of the Kizir formation; 8 – Upper Silurian – Lower Devonian volcanics; 9 – Devonian and Carboniferous terrigenous formations; 10 – Jurassic coal-bearing deposits; 11 – Quaternary deposits; 12 – faults (1 – Iya-Kan, 2 – Kiyai-Okler, 3 – Kingash, 4 – Mana); 13 – modern boundaries of the Sayan-Partizansk basin; 14 – Malinovka paleoseismic dislocation.

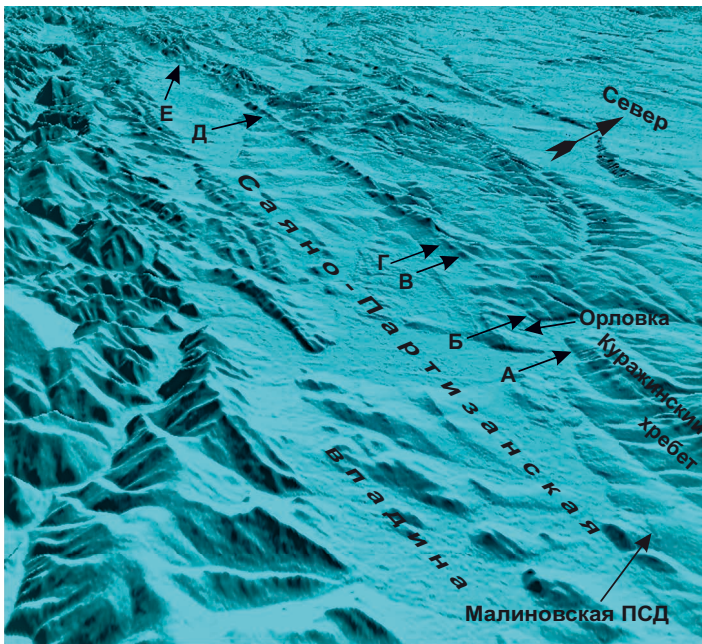


Рис. 4. 3D модель рельефа Саяно-Партизанской впадины с привязкой участков уступов Кияй-Оклерского разлома, показанных на рис. 5 (построена на основе данных SRTM-30м в программе Global Mapper).

Fig. 4. Digital elevation model for the Sayan-Partizansk basin with reference to the locations of the Kiyai-Okler fault scarps (Fig. 5) (generated from SRTM DEM data with 30m resolution in Global Mapper).

также оперяющие их разломы Кингашский, Кияй-Оклерский и Манский. Вероятно, есть активные разломы в недрах Канской глыбы, не выходящие на поверхность. С одним из таких разломов может быть связано субмеридиональное облако эпицентров внутри Канской глыбы в районе возникновения Караганского землетрясения.

Кингашский разлом на рассматриваемом участке проходит вдоль юго-западной границы Кингашской моноклинали, сложенной породами оклерской свиты венда (рис. 3), и выражен уступом высотой до 10–12 м в правом борту долины р. Кингаш. По результатам морфометрических замеров, выполненных нами при полевом обследовании (не опубликованы), амплитуда вертикального смещения достигает 7 м. Разлом проходит вблизи пос. Орье, сел Вознесенка, Малиновка, Большой Арбай, соединяясь вблизи д. Орловка с Кияй-Оклерским разломом. К данному разлому приурочена Малиновская дислокация. Результаты изучения северо-западного окончания Кингашского разлома приведены в статье [Arzhannikov et al., 2004], а в работе [Besstrashnov et al., 2010] проведен анализ космо- и аэрофотоснимков его прохождения к востоку от р. Кан.

Кияй-Оклерский разлом в литературе описан менее детально, чем Кингашский. Он проходит вдоль ядра

антиклинали, отходя от Ийско-Канского разлома в 20 км юго-восточнее пос. Кан-Оклер, далее проходя вблизи деревень Петропавловка, Орловка, Ивановка и Астафьевка, с окончанием в 7 км юго-восточнее с. Кияй. Разломом с юго-запада и юга ограничены породы карымовской свиты среднего девона (рис. 3). Согласно разрезам к геологической карте листа N-46-XI падение разлома северо-восточное. То же направление характерно и для пород свиты, при этом угол падения пород изменяется от 20 до 45°.

Кияй-Оклерский разлом на большем протяжении в современном срезе выступает в качестве юго-западной границы отложений карымской свиты девона (рис. 3). Западная часть разлома также служит северо-восточным ограничением Саяно-Партизанской впадины: от ее северо-западного замыкания до поднятия юго-западной ступени Куражинского хребта (рис. 4, точка А). Далее на юго-восток граница впадины проходит по подножию Куражинского хребта, представленного породами оклерской свиты венда (см. рис. 3). На всем протяжении Кияй-Оклерского разлома, там, где он контролирует границу впадины, его современная тектоническая активность выражена уступом высотой до нескольких метров, на отдельных участках имеющим двухступенчатое строение. Уступом деформированы

слабонаклонные поверхности, примыкающие к основанию склона северо-восточного борта впадины только в пределах современных границ впадины. Все уступы имеют простирание, согласное разломам, их фотографии приведены на рис. 5. Относительно слабый уклон уступов (не более 20°) свидетельствует о возрасте уступа в несколько тысяч лет. Для сравнения, в пределах Восточно-Саянской дислокации по результатам тренчинга и абсолютного датирования уступ крутизной 21° имеет возраст ≈ 7600 лет. Также необходимо отметить, что в поймах всех водотоков, пересекающих зону разлома, следы сейсмогенного вскрытия отсутствуют. На активизацию разлома указывают не только уступы непосредственно на линии его выхода на поверхность, но и террасы в долинах, пересекающих поднятие на северо-восточном крыле разлома. Например, в поперечной долине правого притока р. Конок высота надпойменной террасы составляет 6 м.

Северо-западнее точки наблюдения, показанной на рис. 4, точка Е, уступ сходит на нет и в целом заканчивается выраженность в рельефе Кияй-Оклерского разлома. Окончание разлома не доходит до границ структур Манского прогиба, для которых на данном участке характерны субмеридиональные и северо-восточные простирания.

6.3. Уточнение параметров Кингашского и Кияй-Оклерского разломов с помощью геофизических исследований

Место, где траверс Кияй-Оклерского разлома сходится с границей Манского прогиба, охарактеризовано профилем МТЗ Камарчага – Чёрная речка (рис. 6, 7). Нижнекембрийские и подстилающие их породы Манского прогиба характеризуются высокими значениями кажущегося удельного сопротивления. Разрезы удельных продольных электрических сопротивлений построены от земной поверхности до глубины 25 км.

Как видно из рис. 6, если продолжить прямую линию Кияй-Оклерского разлома, то она выйдет к пикету 12 профиля МТЗ. Но от 10 до 14-го пикета резких изменений в сопротивлении среды не отмечается, хотя профиль идет практически перпендикулярно к линии траверса Кияй-Оклерского разлома. После 14-го пикета удельное электрическое сопротивление пород постепенно повышается по мере вхождения профиля в Манский прогиб.

В отличие от разрезов МТЗ через зоны Кингашского и Ийско-Канского разломов (рис. 8, 9), где тектонические нарушения выражены характерным сгущением изолиний, на профиле Камарчага – Чёрная речка подобные аномалии отсутствуют. Это свидетельствует в пользу отсутствия в данном районе значимых смещений по разрывам северо-западного простирания даже в случае их наличия. Таким образом подтверждается, что активизация Кияй-Оклерского разлома происходила лишь на том его отрезке, который контролирует северо-восточный борт Саяно-Партизанской впадины. Ввиду отсутствия явных деформаций в рельефе на се-

веро-западном фланге разлома за пределами Саяно-Партизанской впадины можно считать, что и в позднем плейстоцене здесь активизации также не было.

На геоэлектрических разрезах Юльевский – Вятка и Кулижа – Вятка (см. рис. 8; рис. 9) показан переход от поднятий Восточного Саяна к впадинам на окраине Сибирской платформы. Этот переход выражен резкой сменой электрических сопротивлений в геологическом субстрате.

Максимальные сопротивления характерны для введенных на поверхность складчатых образований цоколя платформы, пронизанных гранитоидными интрузиями на значительной площади. Осадочный чехол, особенно на участках активизации в виде мезокайнозойских впадин, характеризуется низкими значениями электрических сопротивлений. Зонам активных Кияй-Оклерского, Кингашского и Ийско-Канского разломов соответствуют минимальные значения сопротивления или его значительные градиенты. Подобной картины мы не наблюдаем при пересечении профилем Чёрная речка – Камарчага линии траверса Кияй-Оклерского разлома за северо-западным замыканием Саяно-Партизанской впадины.

С целью подтверждения сеймотектонической природы уступов в зонах Кияй-Оклерского и Кингашского разломов и установления их генетического типа были пройдены шесть малоглубинных профилей ВЭЗ (см. рис. 6). Три первых (рис. 10) расположены в зоне Кингашского разлома в пределах Малиновской дислокации. Профиль 1 пройден вблизи канавы, разрез которой представлен в работе [Arzhannikov et al., 2004]. Профили 2 и 3 пройдены на расстоянии 560 и 830 м соответственно в северо-западном направлении от профиля 1. На участке расположения профиля 1 дислокация наиболее ярко выражена и представлена уступом высотой около 5 м, обращенным на юго-запад. Профили 2 и 3 расположены на слабонаклонной пашне, и пересекаемый ими уступ Малиновской дислокации имеет пологий уклон высотой не более 0.5 м. Изменения в строении дислокации фиксируются как морфологически, так и в геоэлектрических разрезах ВЭЗ.

На профиле 1 зона тектонического нарушения относительно крыльев разлома представлена высокоомным наполнением – более 900 Ом·м. На профиле 3 наблюдается обратная картина – тектоническая зона относительно крыльев разлома выражена низкими сопротивлениями – около 300 Ом·м. На профиле 2, расположенном между профилями 1 и 3, представлен промежуточный вариант – зона тектонического нарушения выражена слабо в значениях удельного электрического сопротивления относительно значений этого параметра на крыльях разлома. На всех трех профилях тектонический контакт представлен зоной разуплотнения (трещиноватости) шириной несколько десятков метров, по электропроводности, отличающейся от пород, слагающих крылья разломов. Подобное строение дислокации свидетельствует о длительной проработке разломной зоны. Также характерным является крутое

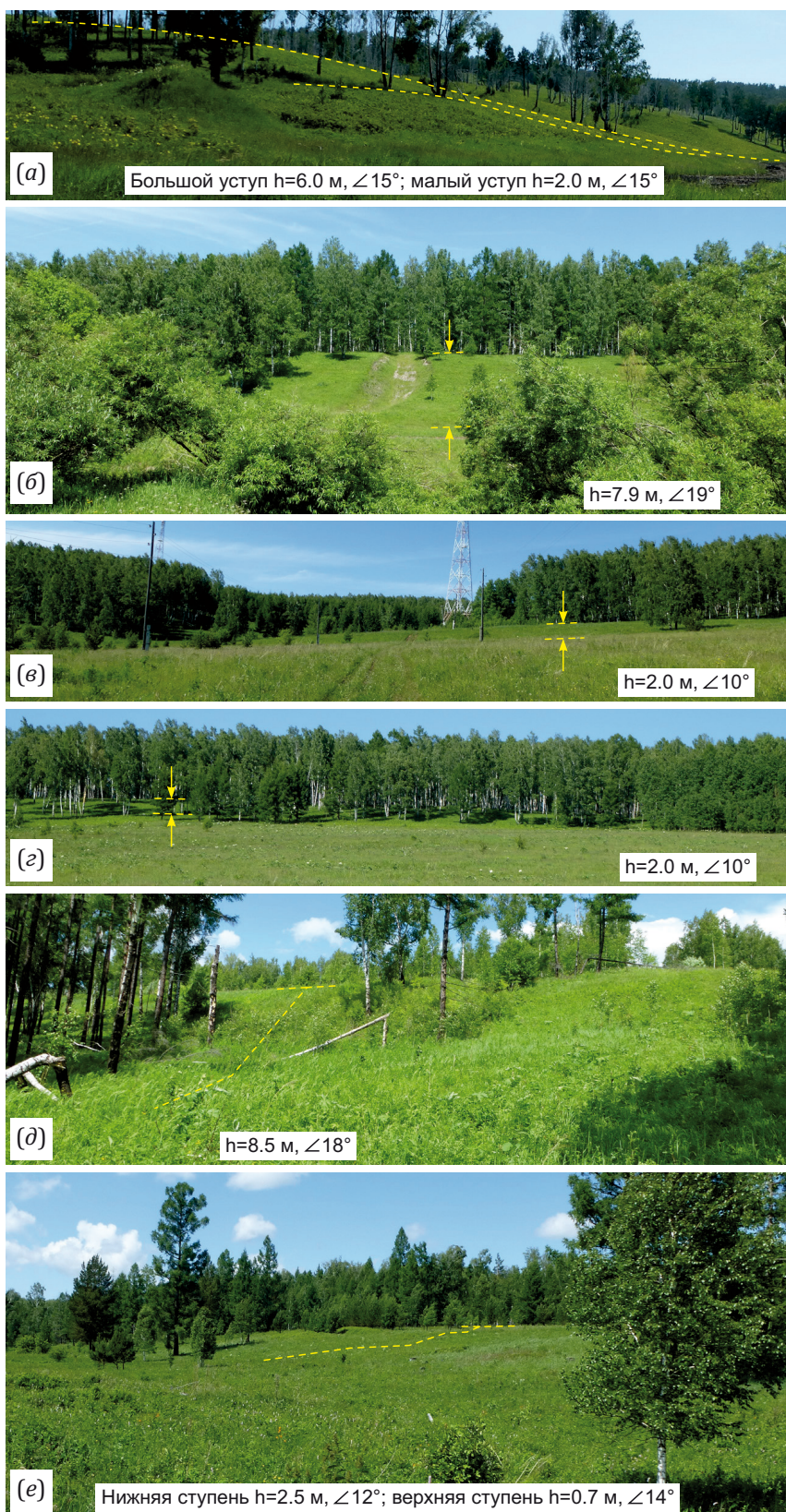


Рис. 5. Фотографии уступов в зоне Кияй-Оклерского разлома. На фрагменте (б) видна геологоразведочная канава, забой которой представлен коренными породами, что свидетельствует о цокольном строении террасированной поверхности в долине р. Анжи (рыхлые отложения практически отсутствуют). Все уступы имеют северо-западное простирание (около 300°).

Fig. 5. Photographs of the scarps within the Kiyai-Okler fault zone. Fragment (б) shows a geologic exploratory trench whose bedrock bottom indicates a rock-defended terrace in the Anzha River valley (unconsolidated sediments are almost entirely absent). All scarps have a northwestern strike (approximately 300°).

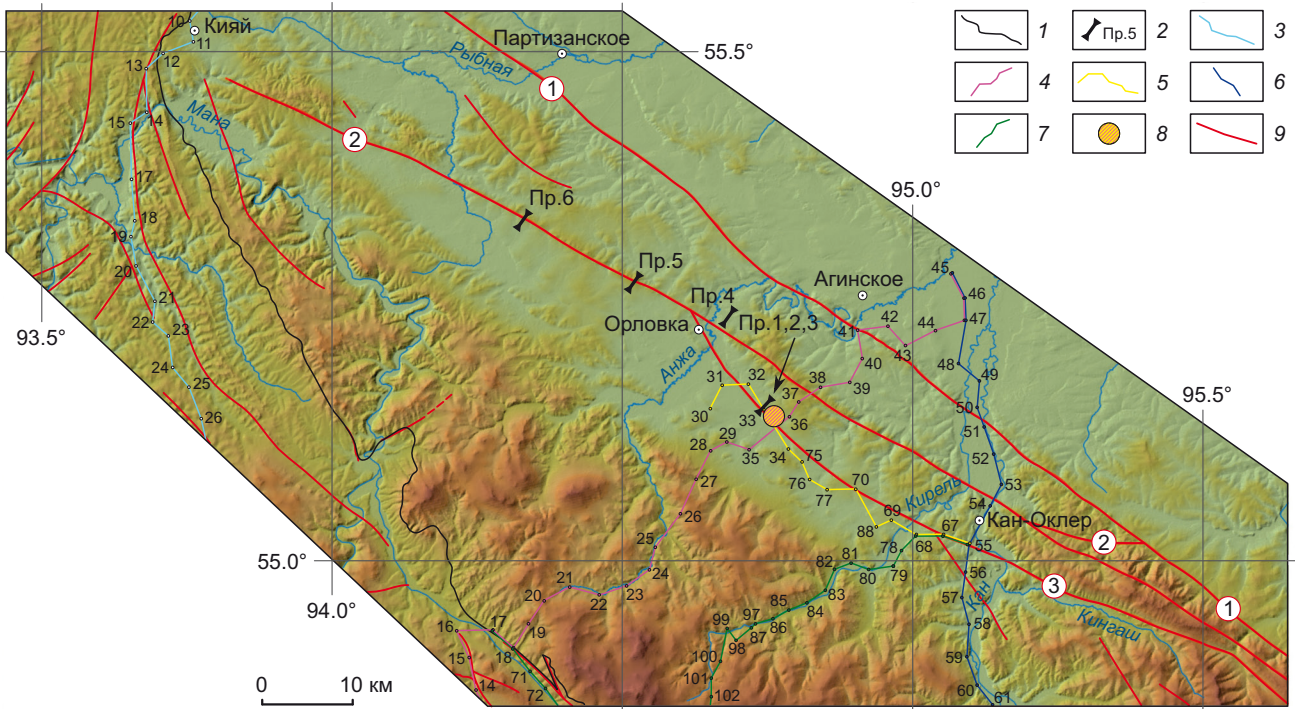


Рис. 6. Схема расположения региональных и малоглубинных геофизических профилей в Саяно-Партизанской впадине и ее окрестностях.

1 – северо-восточная граница Манского прогиба; 2 – профили, построенные методом малоглубинной геофизики (ВЭЗ); 3–7 – региональные геофизические профили: 3 – Камарчага – Чёрная речка, 4 – Юльевский – Вятка, 5 – Малиновка – Орье (МТЗ), 6 – Кулижа–Вятка, 7 – Мина – Орье; 8 – центр Малиновской дислокации; 9 – активные разломы: 1 – Ийско-Канский, 2 – Кияй-Оклерский, 3 – Кингашский.

Fig. 6. Location of shallow and regional geophysical profiles in the Sayan-Partizansk Basin and its vicinity.

1 – northeastern boundary of the Mana trough; 2 – profiles obtained using shallow geophysical survey (VES); 3–7 – regional geophysical profiles: 3 – Kamarchaga – Chernaya Rechka, 4 – Yulievsky – Vyatka, 5 – Malinovka – Orye (MTS), 6 – Kulizha – Vyatka, 7 – Mina – Orye; 8 – center of the Malinovka dislocation; 9 – active faults: 1 – Iya-Kansk, 2 – Kiyai-Okler, 3 – Kingash.

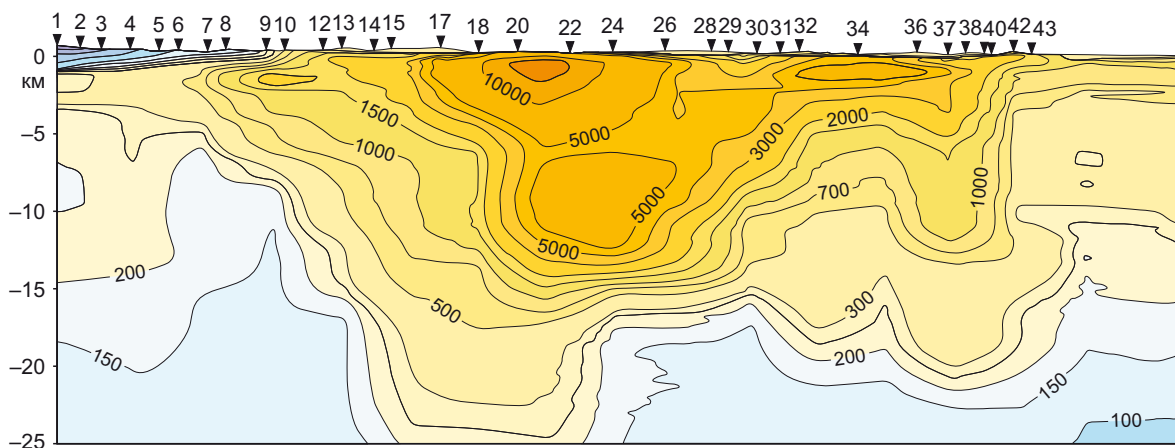


Рис. 7. Геоэлектрический разрез на участке профиля МТЗ Камарчага – Чёрная речка между пикетами 1 и 47 (по материалам [Geological-Geophysical Study..., 2005]).

Fig. 7. Geoelectric cross-section of the MTS Kamarchaga – Chernaya Rechka profile between stations (pickets) 1 and 47 (after [Geological-Geophysical Study..., 2005]).

падение разрыва в северо-восточном направлении, т.е. в сторону приподнятого крыла. Это говорит о взбросовой кинематике Кингашского разлома.

Геоэлектрические разрезы профилей, пройденных в зоне Кий-Оклерского разлома, имеют существенные отличия от профилей Кингашского разлома (рис. 11). На профилях 5 и 6 сеймотектоническому уступу на поверхности соответствует резкий переход от высокоомных пород (300–600 Ом·м) к низкоомным (5–60 Ом·м). В отличие от профилей Кингашского разлома здесь отсутствует широкая зона повышенной трещиноватости между крыльями разлома. Зона разлома представляет собой контакт между породами с разными электропроводящими свойствами. Разлом является сбросом, так как круто падающий контакт направлен в сторону впадины, а сама разломная зона является границей этой впадины. На поверхности сбросу соответствует сеймотектонический уступ, представленный на рис. 5.

Профиль 4 пройден через уступ в правом борту р. Анжа. Данный профиль был пройден с целью проверить предположение, что уступ, простирающийся параллельно основной ветви Кий-Оклерского разлома, является его оперяющим разрывом, на что указывают геоморфологические признаки. Однако геоэлектрический разрез профиля ВЭЗ (рис. 11) не подтверждает это предположение.

6.4. Генезис структуры «Береть»

В устных сообщениях (А.Л. Стром) и в статье [Besstrashnov et al., 2010] выдвигается тезис о сейсмическом происхождении петлеобразной структуры у пос. Береть вблизи впадения р. Береть в р. Мана, равноудаленной как от Ийско-Канской системы разломов, так и от Главного Саянского разлома (см. рис. 1). В статье [Besstrashnov et al., 2010] она описана как «громдный скальный оползень объемом в десятки миллионов кубометров, произошедший в гранитах на склоне

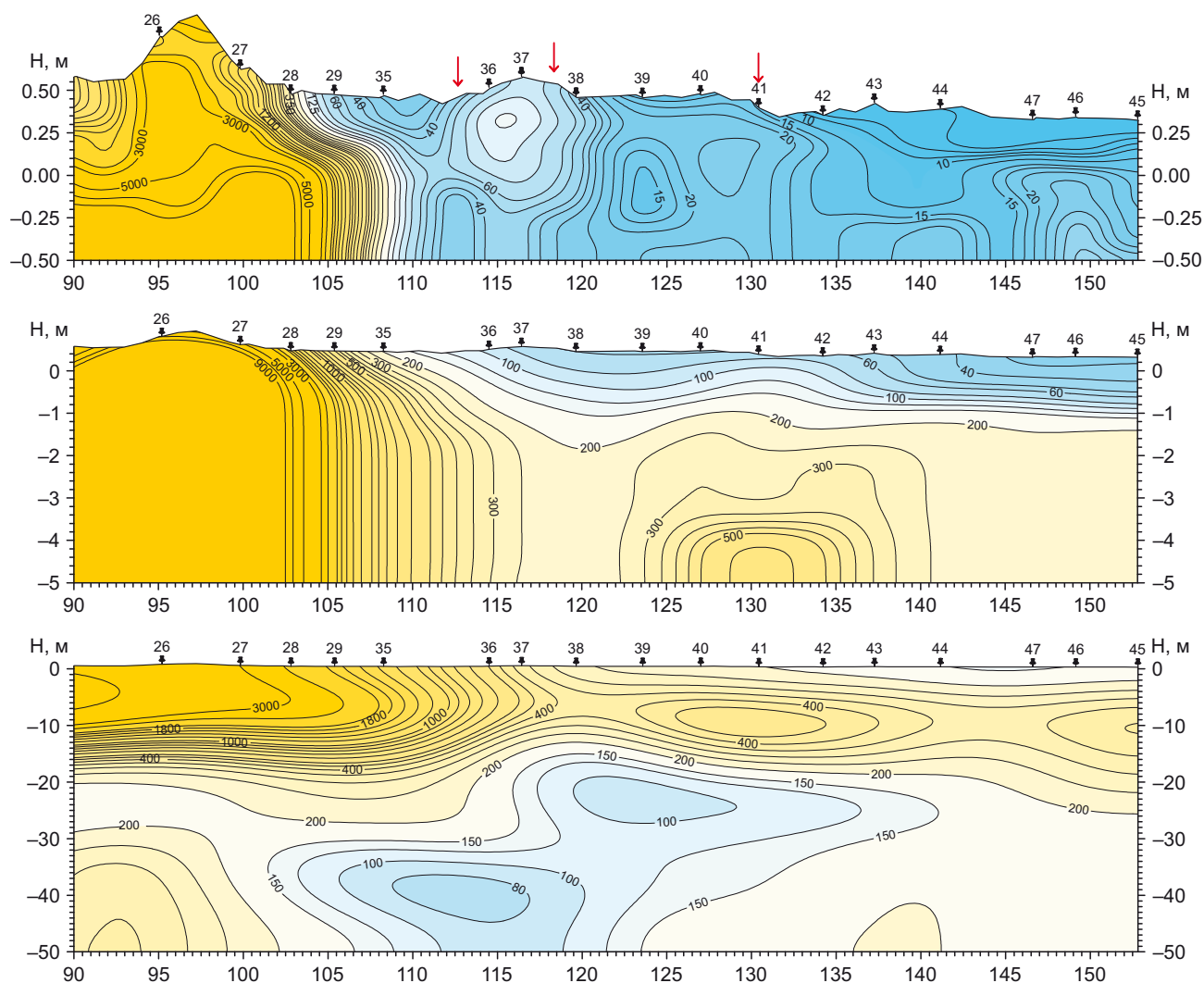


Рис. 8. Геоэлектрический разрез на участке профиля МТЗ Юльевский – Вятка между пикетами 26 и 45 (по материалам [Geological-Geophysical Study..., 2005]). Вертикальные бордовые стрелки соответствуют точкам пересечения разреза разломами.

Fig. 8. Geoelectric section of the MTS Yulievsky – Vyatka profile between stations 26 and 45 (after [Geological-Geophysical Study..., 2005]). Vertical deep-red arrows indicate points where the section is intersected by faults.

умеренной крутизны». Структуры подобного типа встречаются вдоль правобережья долины Маны в ее правом борту (рис. 12). Они образованы в результате меандрирования русла Маны в условиях выровненной поверхности и начала подъема территории. При снижении базиса эрозии и увеличении скорости водного потока произошло размывание перешейков (пят) меандр и консервирование уже глубоко врезаемых петель брошенного русла.

Гипотеза об обвальном-оползневом характере формирования структуры вблизи устья р. Береть опровергается следующими фактами. В ходе полевого обследования в 2022–2023 гг. установлено, что в тыловой части предполагаемого оползня-обвала возвышается

холм – останец из коренных пород, преимущественно кристаллического (кремнистого) сланца, подмытый как со стороны русла р. Береть, так и с противоположной (внутренней) стороны руслом древней реки. Поверхность «обвального» тела ровная, в настоящее время используется по сельскохозяйственному назначению. В неглубоких закоушках приповерхностные слои имеют нормальное залегание с хорошо сформированной почвой. Отсутствуют не только глыбовые, но и крупнощелевые включения. В шурфе старой разработки на краю структуры в боковой стенке на глубине 1.5 м залегает крупная галька и плитчатые отдельности с округлыми гранями. При этом, каким бы ни был генезис этой структуры, возраст ее может составить

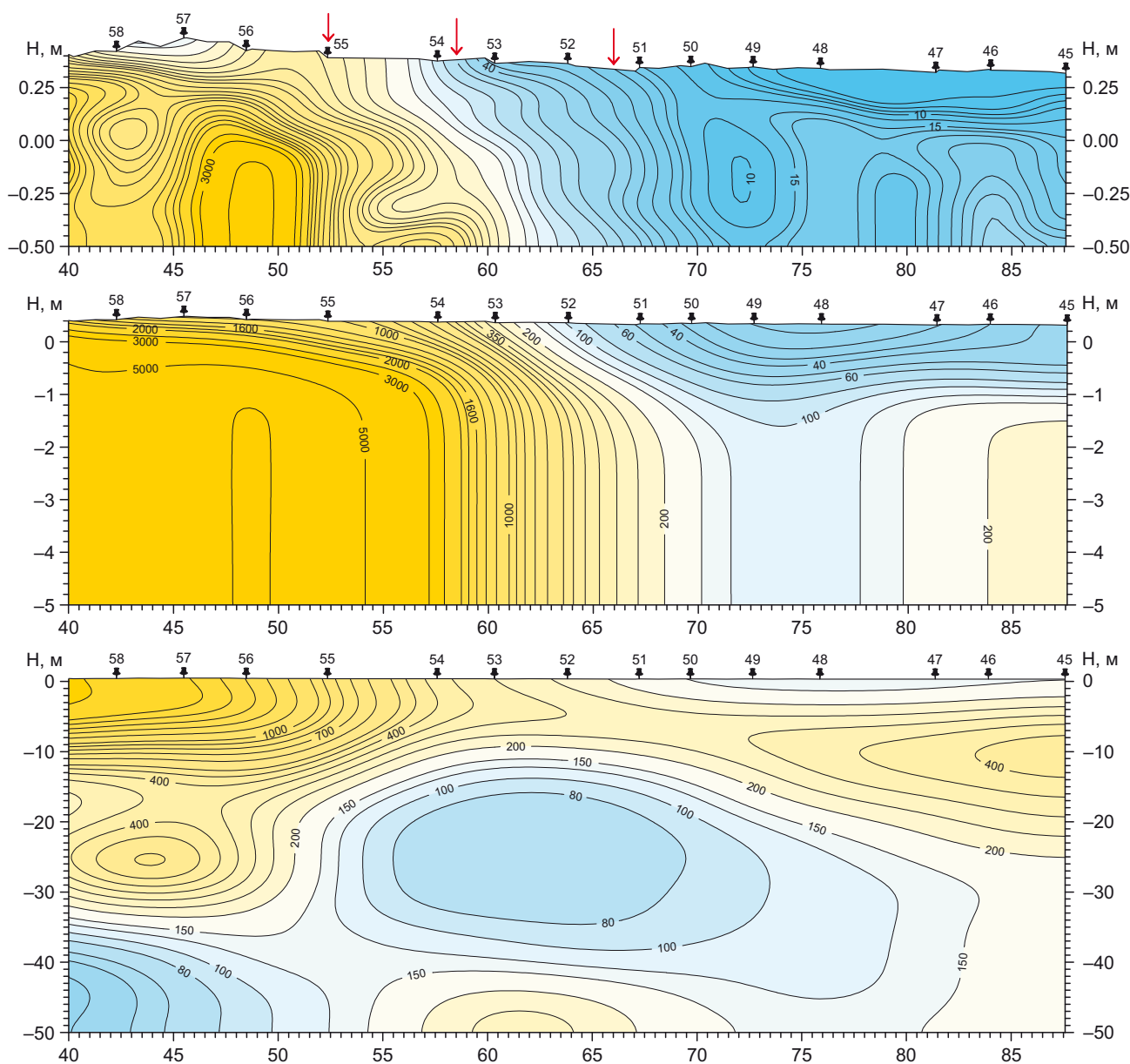


Рис. 9. Геоэлектрический разрез на участке профиля МТЗ Кулижа – Вятка между пикетами 57 и 45 (по материалам [Geological-Geophysical Study..., 2005]). Вертикальные бордовые стрелки соответствуют точкам пересечения разреза разломами.

Fig. 9. Geoelectric section of the Kulizha – Vyatka MTZ profile between stations 57 and 45 (based on [Geological-Geophysical Study..., 2005]). Vertical deep-red arrows indicate points where the section is intersected by faults.

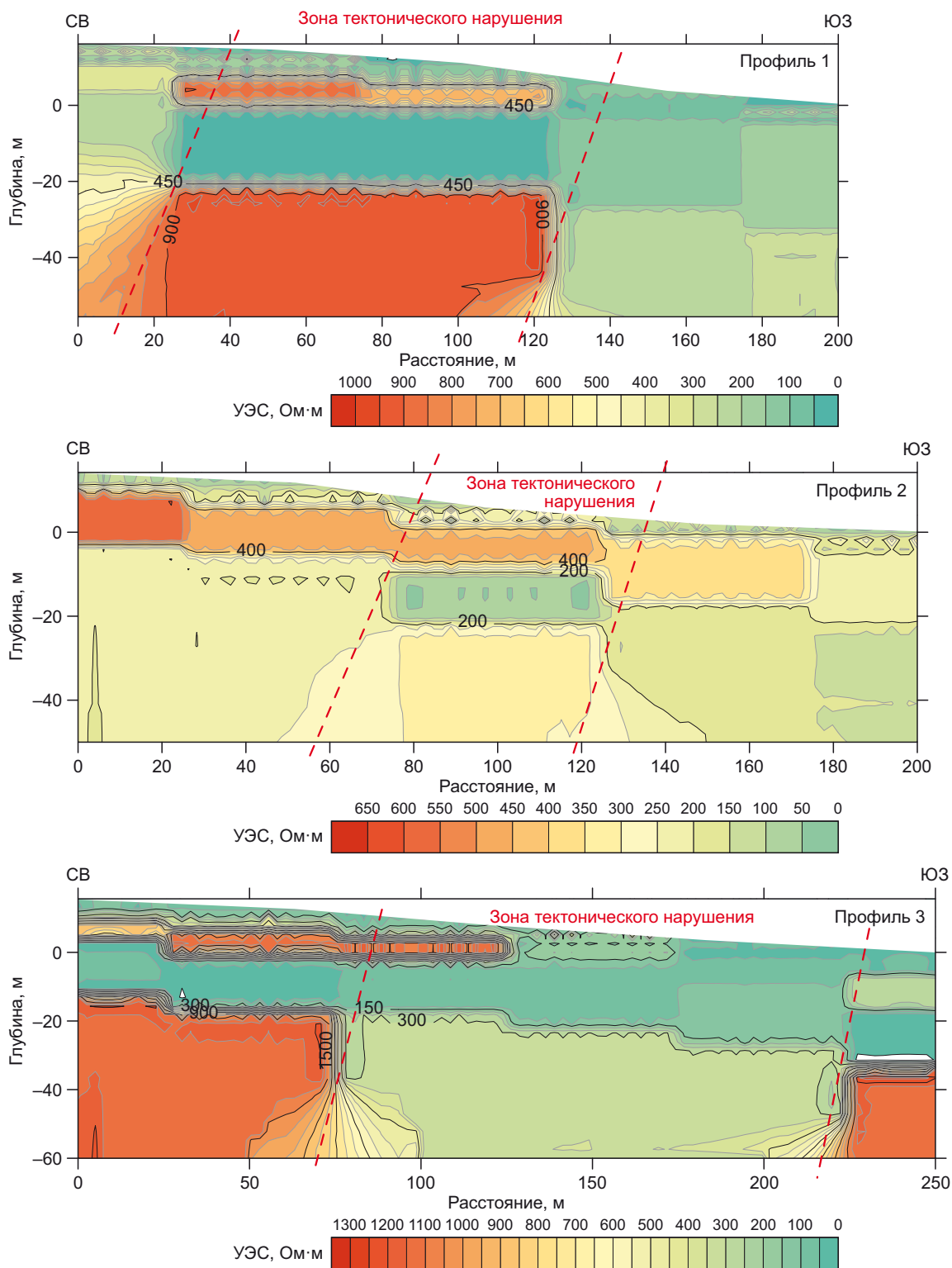


Рис. 10. Геоэлектрические разрезы в зоне Кингашского разлома в пределах Малиновской палеосейсмодислокации. Расположение профилей показано на рис. 6.

Fig. 10. Geoelectric sections in the Kingash fault zone within the Malinovka paleoseismic dislocation. Profile locations are shown in Fig. 6.

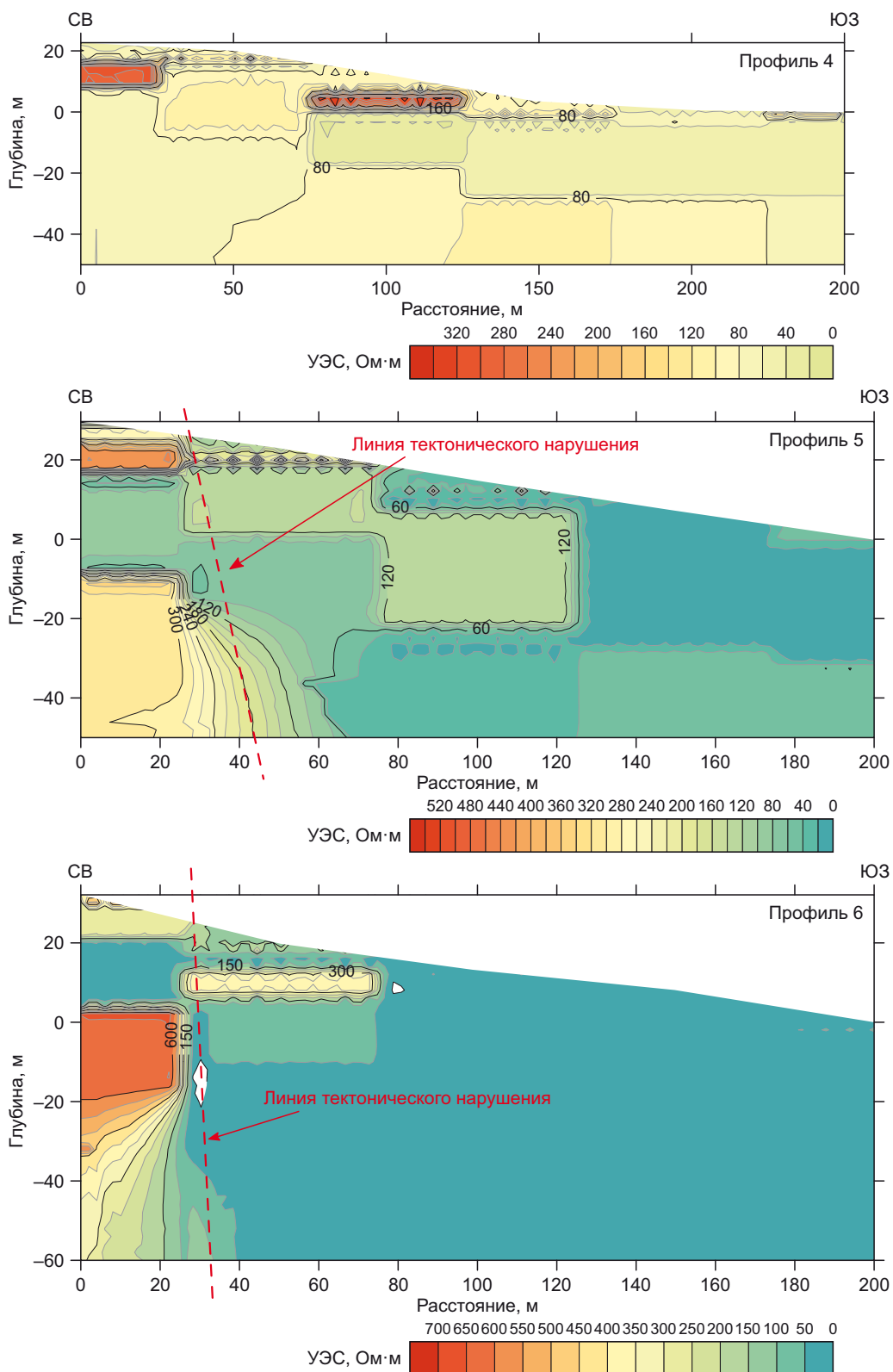


Рис. 11. Геоэлектрические разрезы профилей ВЭЗ № 4, 5 и 6.

Fig. 11. Geoelectric sections of VES profiles No. 4, 5, and 6.

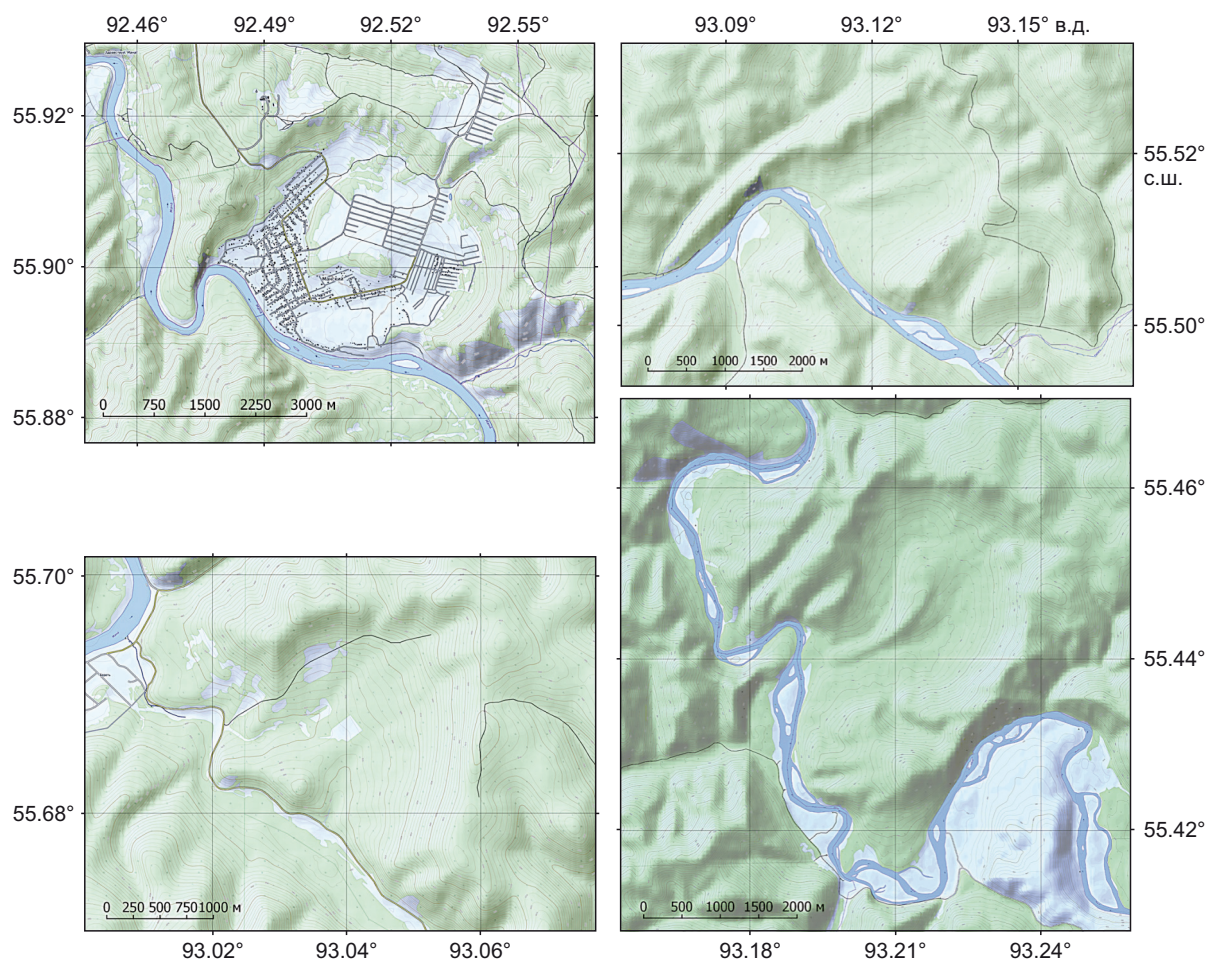


Рис. 12. Петлеобразные структуры в правом борту долины р. Мана. Слева внизу – структура «Береть».
Fig. 12. Loop-like structures on the right side of the Mana River valley. Bottom left: the "Beret" structure.

десятки, а то и сотни тысяч лет. В любом случае связь структуры «Береть» с современной сейсмической активностью разломов маловероятна.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные геолого-геофизические исследования и результаты ранее выполненных работ [Arzhannikov et al., 2004] свидетельствуют о высоком сейсмическом потенциале активных разломов в обрамлении Саяно-Партизанской мезозойской впадины. Формирование впадины связано с процессами палеозойской, а затем и мезозойской активизации, охватившими широкой полосой часть Канской глыбы вдоль ее северо-восточной границы.

Удаленность сейсмоактивных структур от Красноярска компенсируется их простираем в направлении к городу, что предполагает ту же направленность длинных осей эллипсов максимальных изосейст сильных землетрясений. Кроме того, недостаточная изученность сейсмоактивности разломов привела к тому, что в модели ОСР-2016 зона ВОЗ Ийско-Канского разлома была приближена к Красноярску на расстояние в 31 км. При этом указанной зоне приписывают магнитудный потенциал оперяющих разломов (Кияй-Оклерского и

Кингашского). В контраст к этому в модели сейсмогенерирующих зон ОСР-97 ближайший к Красноярску линеймент охарактеризован максимальной магнитудой $M_{max}=6.0$. Своим северо-западным сегментом он проходит по центральной части Саяно-Партизанской впадины, не доходя около 12 км до Манского прогиба.

В данной работе приведены результаты исследований сейсмогенерирующих разломов Саяно-Партизанской впадины и показана неправомочность распространения зон ВОЗ за пределы впадины в северо-западном направлении. Отдельных исследований заслуживают структуры возможно сейсмического генезиса в зоне динамического воздействия северо-западного фланга Ийско-Канского разлома (уступ и оползень в районе пос. Бархатово).

7.1. Структурный план Кияй-Оклерского и Кингашского разломов и их связь с Ийско-Канским разломом

Два активных разлома определяют сейсмический потенциал Саяно-Партизанской впадины: Кияй-Оклерский и Кингашский. В объяснительной записке к Геологической карте N-46-XI оба разлома описываются как один – Кияй-Арбайский: «Кияй-Арбайский разлом

расположен среди девонских отложений <...> Разлом является надвигом с поверхностью, круто падающей на северо-восток. В районе дер. Орловки он ветвится, при этом главная ветвь его проходит по границе павловской и оклерской свит» [Geological Map..., 1962, с. 49]. Исходя из подобной позиции в работе [Arzhannikov et al., 2004] разлом, в зоне которого расположена Малиновская палеосейсмогенная структура, назван Кияй-Арбайским разломом. В то же время в записке к листу N-46-XII две ветви Кияй-Арбайского разлома уже описываются как две отдельные структуры: Оклерский и Арбинский разломы, разделенные Кингашской моноклиналью [Geological Map..., 1968, с. 22–26], сложенной породами оклерской свиты венда [State Geological Map..., 2008].

По нашему мнению, всячее северо-восточное крыло Кияй-Оклерского разлома на всем своем протяжении представлено породами нижней подсвиты карымской свиты (см. рис. 2). И таким образом этот разлом от д. Орловки сохраняет свое прямолинейное простирание на юго-восток вплоть до долины Кана, а затем изменяет свое простирание на субширотное и причленяется к Ийско-Канскому разлому (см. рис. 3, 5).

Кингашский разлом – это разлом, который дугой отходит от Кияй-Оклерского разлома в районе д. Орловки, далее идет субпараллельно Кияй-Оклерскому разлому, включает Малиновскую дислокацию, имеет прямолинейное продолжение по основанию крутого правого борта долины р. Кингаш и затем юго-восточнее также причленяется к Ийско-Канскому разлому. В структурном плане он является юго-западной границей блока, сложенного породами оклерской свиты венда. Подобный структурный план активных разломов подтверждается результатами наших геолого-геофизических изысканий.

Таким образом, Кингашский разлом, включающий Малиновскую дислокацию, в пределах Саяно-Партизанской впадины является оперяющим по отношению к Кияй-Оклерскому разлому. Это означает, что при оценке сейсмического потенциала Кингашского разлома (сейсмолинеамента) его протяженность в северо-западном направлении должна заканчиваться в районе д. Орловки. Если рассматривать отрезок разлома, обновленного Малиновской дислокацией, как продолжение Кияй-Оклерского разлома, как это сделано в работах [Geological Map..., 1962; Arzhannikov et al., 2004], то это не только увеличило бы сейсмический потенциал Кингашского разлома за счет увеличения его длины вплоть до с. Кияй, но и сократило бы расстояние между столь протяженным сейсмолинеаментам и г. Красноярском. В свою очередь, это привело бы к неправомерному завышению уровня сейсмической опасности в г. Красноярске.

7.2. Признаки активизации Ийско-Канского разлома

Специализированные сейсмогеологические исследования в зоне Ийско-Канского разлома не проводи-

лись. Его отчетливая выраженность в рельефе в северо-западном направлении сходит на нет в районе пересечения зоны разлома долиной р. Рыбной в 5 км южнее пос. Партизанское (см. рис. 6), т.е. в 105 км от г. Красноярск. Что же касается уступа в районе с. Бархатово и оползня у пос. Береть, то, как показано выше, для них нет установленных признаков не только их связи с активизацией Ийско-Канского разлома, но и их сейсмического генезиса.

7.3. Магнитудный потенциал Кингашского и Кияй-Оклерского разломов

Одним из наиболее важных аспектов в определении сейсмической опасности является оценка сейсмического потенциала сейсмогенерирующих зон, обычно представляемая магнитудой возможных землетрясений и их повторяемостью.

При определении магнитудного потенциала Кияй-Арбайского разлома (в нашей коннотации Кингашского) авторами работы [Arzhannikov et al., 2004] была использована зависимость магнитуды от разовой амплитуды смещения. В расчет бралась максимальная амплитуда смещения, определенная, в том числе, и по разрезу канавы. Авторы названной работы считают, что амплитуда определена двумя независимыми способами, которые дали приблизительно одинаковые значения – 6.6–7.8 м. Первый способ заключался в определении амплитуды смещения крыльев разлома по круто наклонной плоскости (45–65°). Второй способ – графическое «растягивание» смятых в складки глинистых отложений во фронте взброса до первичного субгоризонтального залегания. Подобный прием часто используется при построении сбалансированных разрезов в надвиговых поясах.

Основываясь на уравнении регрессии M от D из работы [Chipizubov, 1998] (интегральная амплитуда смещения), авторы работы [Arzhannikov et al., 2004] считают, что Малиновская дислокация была образована при землетрясении с магнитудой $M=8.0$. Однако, исходя из представленного в работе [Arzhannikov et al., 2004] разреза канавы, можно предположить, что смятие и утолщение глинистого слоя определены условиями его накопления в неглубоком рве в основании уже существовавшего до последней подвижки уступа. О существовании уступа также свидетельствуют делювиальные отложения на его склоне, деформированные, в том числе, и во время последней подвижки. За нижней кромкой уступа, на разрезе справа от перегиба поверхности, эти отложения отсутствуют. Таким образом, в расчетах можно использовать лишь амплитуду смещения по наклонной плоскости, в результате которого образовался уступ. Но максимальная амплитуда смещения, определенная по высоте современного уступа, будет завышена и не может быть взята в расчет магнитуды, так как уступ образован как минимум двумя подвижками или более. В результате полученная в работе [Arzhannikov et al., 2004] оценка $M=8.0$ может рассматриваться исключительно как верхняя

граница для силы землетрясений, произошедших в районе Малиновской дислокации.

Максимальный сейсмический потенциал активных разломов Саяно-Партизанской впадины относительно корректно может быть оценен уравнениями регрессии M от L для взбросов активизированных платформ [Chipizubov, 1998]:

$$M=5.2+1.17 \cdot \lg L,$$

где L – протяженность дислокации при условии, что она имеет длину, равную всей длине разлома. При длине Кияй-Оклерского и Кингашского разломов 113 и 91 км их магнитудный потенциал не превышает 7.6 и 7.5 соответственно. На картах ОСР зоны ВОЗ этих разломов могут быть представлены в виде линеамента северо-западного простирания от с. Кияй на северо-западе до пересечения с Агульским хребтом на юго-востоке. Сейсмический потенциал такого сейсмолинеамента следует установить равным $M=7.5 \pm 0.2$. Повторяемость землетрясений в максимальном проявлении очень низкая и не превышает одно событие за голоцен. Следует также отметить значительную неопределенность в вопросе возраста дислокации. В работе [Arzhanikov et al., 2004] указано, что он «не древнее 9–10 тыс. лет назад», со ссылкой на работу [Ruzhich et al., 2002b], в которой временные рамки указаны экспертным путем, без проведения специальных исследований.

С учетом параметров Кияй-Оклерского разлома при его представлении в виде системы отдельных линеаментов их сейсмический потенциал может быть принят ниже уровня $M=7.5$. Такой подход, в частности, был реализован в моделях ОСР-2012 и ОСР-2014 [Ulomov et al., 2014], а также в работах [Imaev et al., 2015; Seelev et al., 2018].

7.4. Расчеты максимальных сотрясений от Ийско-Оклерского разлома и ближайшего линеамента по модели ОСР-2016

Оценка максимальной интенсивности сотрясений I_{\max} в Красноярске от сильных землетрясений, приуроченных к разломам, проходящим вблизи Саяно-Парти-

занской впадины, проведена на основе представлений о протяженном очаге землетрясения. При этом использовалась модель, предложенная в работе [Gusev, Shumilina, 1999], с коэффициентами для материковой части Северной Евразии. Расчеты велись в соответствии с методикой, использованной для расчета карт ОСР 97 – ОСР-2016. Для этого использовались алгоритмы, заложенные в программах расчета PRB-60/EAST.

В указанной методике очаг землетрясения представляется прямоугольником с размерами $L \cdot W$, где протяженность L (км) определяется по формуле:

$$L=k^{0.5} \cdot 10^{(M_w-4.1)/2} \cdot 10^{\Delta M/2},$$

а значение k – отношения длины очага L к его ширине W по формуле:

$$k=1.2M_w-5.6$$

при $M_w=5.5...8.0$ (для $M_w \leq 5.5$ $k=1$, а для $M_w \geq 8.0$ $k=4$).

Величина ΔM – случайная нормально распределенная добавка с нулевым математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением, равным 0.15. Соотношение между магнитудой по поверхностным волнам M_s и моментной магнитудой M_w , принятое в методике, показано в табл. 3.

Среднее значение случайной величины $10^{\Delta M/2}$ равно 1.015, при этом 80 % ее значений отклоняются от него не более чем на 23 %. Учитывая умеренную вариацию L , в дальнейших расчетах авторы использовали ее средние значения L_{av} (табл. 3).

Расчеты проводились для Кияй-Оклерского разлома, а также для линеамента 228 из модели очаговой сейсмичности ОСР-2016, ближайшего к Красноярску, по его параметрам. Для них было принято, что протяженный очаг землетрясения ориентирован вдоль их простирания, т.е. в направлении Красноярска, с вертикальным падением и верхней кромкой очага у дневной поверхности.

В моделях ОСР-97 – ОСР-2016 для абсолютного большинства линеаментов допускается выход очага за пределы линеамента до 0.5 L (центр очага может находиться на конце линеамента, не выходя за него). Но

Таблица 3. Параметры очагов землетрясений, ближайших к Красноярску

Table 3. Parameters of the earthquake sources nearest to Krasnoyarsk

M_s	M_w	L_{av} , км	Кияй-Оклерский разлом		Линеамент 228 модели ОСР-2016		
			R_{\min} , км	I_{\max} *, балл	R_{\min} , км	I_{\max} *, балл	T_{Ms} , лет
7.5	7.5	94	112	7.3/7.1	69	8.4/7.8	10000
7.0	7.0	48	93	6.5/6.5	50	7.7/7.5	4000
6.5	6.63	29	85	6.0/6.0	42	7.1/7.1	1600
6.0	6.23	16	80	5.2/5.3	37	6.5/6.5	640

Примечание. * – для сравнения приведены значения I_{\max} , определенные по двум моделям: по макросейсмической модели из работы [Gusev, Shumilina, 1999] и по формуле Блейка-Шебалина со средними значениями коэффициентов [Bune, Gorshkov, 1980] с использованием значений M_s и R_{\min} и глубины гипоцентра $W/2$.

Note. * – for reference, here are I_{\max} values determined based on two models: macroseismic model from [Gusev, Shumilina, 1999] and Blake-Shebalin formula with average coefficients [Bune, Gorshkov, 1980] using M_s and R_{\min} values and hypocenter depths $W/2$.

для линеамента 228 в северо-западном направлении допускается выход очага не более чем на $0.1 L$. Такое ограничение в случае Кийй-Оклерского разлома представляется вполне оправданным, поскольку с северо-востока он ограничен стабильным Манским прогибом. Таким образом, центр ближайшего к Красноярску протяженного очага сильного землетрясения должен находиться на расстоянии $0.4 L$ к юго-востоку от конца линеамента, ориентированного в сторону города.

С учетом удаленности Кийй-Оклерского разлома от границ города на 74 км минимальное расстояние от города до проекции центра очага на дневную поверхность R_{\min} для землетрясения с $M_s=7.5$, с $L_{av}=94$ км составляет $74+0.4\cdot 94=112$ км. По модели [Gusev, Shumilina, 1999] на таком расстоянии $I_{\max}=7.3$ балла. Значения I_{\max} для других магнитуд приведены в табл. 3. Аналогичные расчеты выполнены и для линеамента 228, удаленного от границ Красноярска на 31 км; полученные значения I_{\max} приведены в табл. 3. Они более чем на 1 балл выше оценок I_{\max} установленных для Кийй-Оклерского разлома.

В модели ОСР-2016 средний период повторения землетрясений T_{M_s} для $M_s=7.5$ на линеаментах 228 принят равным $T_{7.5}=10000$ лет, что хорошо согласуется с повторяемостью, предложенной для Кийй-Оклерского разлома. При уменьшении магнитуды на 0.5 период T_{M_s} снижается в 2.5 раза. В то же время для абсолютного большинства линеаментов Алтае-Саянской области с учетом графика повторяемости региона и суммарной длины линеаментов принято, что $T_{7.0}/T_{7.5}=1.18$, $T_{6.5}/T_{7.0}=0.81$ и $T_{6.0}/T_{6.5}=3.40$.

Важно также отметить, что в рамках использованной методики к значениям, полученным по модели [Gusev, Shumilina, 1999], в дальнейших расчетах добавляются две случайных величины, которые приводят к дополнительному повышению нормативных значений сейсмической интенсивности [German, 2025].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы главные сейсмоактивные структуры северо-западного фланга Восточного Саяна, очаги землетрясений в которых представляют наибольшую сейсмическую опасность для г. Красноярска. Представлена уточненная схема Кийй-Оклерского и Кингашского сейсмогенерирующих разломов в пределах мезозойской Саяно-Партизанской впадины. Сейсмогеологическими исследованиями установлены признаки обновления и некоторые параметры палеоземлетрясений в зонах этих разломов в голоцене. Предельная магнитуда землетрясений, генерируемых очагами в этих разломах, может достигать $M_{\max}=7.5$. На картах ОСР разломы могут быть представлены единой зоной ВОЗ, северо-западное окончание которой определяется границей Манского прогиба. Следует считать, что эта зона ВОЗ приурочена к системе Канских разломов. Максимально возможная интенсивность в Красноярске в случае реализации полного потенциала данной зоны ВОЗ может составить 7.3 балла по шкале MSK-64.

Для дальнейшего изучения системы Канских разломов целесообразно провести треннинг дислокаций и воздушное лазерное сканирование. Это позволит уточнить структурный план сейсмогенных разрывов, их генетический тип и кинематику, определить основные параметры местных палеоземлетрясений.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

10. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Arzhannikov S.G., Gladkov A.S., Semenov R.M., 2004. Late Quaternary Geodynamics and Tectonic Activity Within the Kan Fault System (Southwestern Siberian Platform). Russian Geology and Geophysics 45 (4), 430–442 (in Russian) [Аржанников С.Г., Гладков А.С., Семёнов Р.М. Позднечетвертичная геодинамика и импульсные тектонические движения в зоне влияния Канской системы разломов (юго-запад Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 4. С. 430–442].

Belousov O.V., Smekalin O.P., German V.I., 2023. Search and Study of Potentially Seismoactive Structures in a 70-km Zone Around Krasnoyarsk. In: Geodynamics and Mineralogy of North Eurasia. Proceedings of the VI International Scientific Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Dobretsov Geological Institute SB RAS (March 13–17, 2023). Buryat State University, Ulan-Ude, p. 73–76 (in Russian) [Белусов О.В., Смекалин О.П., Герман В.И. Поиск и изучение потенциальных сейсмоактивных структур в 70 км зоне вокруг Красноярска // Геодинамика и минералогия Северной Евразии: Материалы VI международной научной конференции, посвященной 50-летию Геологического института им. Н.Л. Добрецова СО РАН (13–17 марта 2023 г.). Улан-Удэ: БГУ, 2023. С. 73–76].

Besstrashnov V.M., Imaev V.S., Strom A.L., 2010. Once Again About Paleoseismic Dislocations in the Northwestern Part of the Main Sayan Fault in the Light of the Lessons Learned from Some Catastrophic Earthquakes. Georisk 1, 54–58 (in Russian) [Бесстрашнов В.М., Имаев В.С., Стром А.Л. Еще раз о палеосейсмодислокациях в северо-западной части зоны Главного Саянского разлома в свете уроков некоторых катастрофических землетрясений // Геориск. 2010. № 1. С. 54–58].

Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Seminsky K.Z., Sanikov V.A., Radziminovich N.A., Salko D.V., Shagun A.N., 2021. The Bystrinskii Earthquake in the Southern Baikal Region

(Sep. 21, 2020, $M_w=5.4$): General Characteristics, Basic Parameters, and Deformation Signs of the Transition of the Focus to the Meta-Unstable State. *Doklady Earth Sciences* 498 (1), 427–431. <https://doi.org/10.1134/S1028334X21050044>.

Bune V.I., Gorshkov G.P. (Eds), 1980. Seismic Zoning of the USSR: Methodological Basis and Regional Description of the Map of the 1978. Nauka, Moscow, 308 p. (in Russian) [Сейсмическое районирование территории СССР: Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков. М.: Наука, 1980. 308 с.].

Chipizubov A.V., 1998. Revealing of One-Act and Coeval Paleoseismodislocations and Determination of Paleoseismicity Magnitudes by Their Scales. *Russian Geology and Geophysics* 39 (3), 386–398 (in Russian) [Чипизубов А.В. Выделение одноактных и одновозрастных палеосейсмодислокаций и определение по их масштабам магнитуд палеоземлетрясений // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 3. С. 386–398].

Chipizubov A.V., Smekalin O.P., 1999. Paleoseismodislocations and Related Paleoseismicity Along the Major Sayan Fault Zone. *Russian Geology and Geophysics* 40 (6), 936–947 (in Russian) [Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6. С. 936–947].

Earthquakes in the USSR, 1961. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 412 p. (in Russian) [Землетрясения в СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 412 с.].

Emanov A.F., Filina A.G., Emanov A.A., Fateev A.V., Leskova E.V., 2006. The Altai-Sayan Region. In: *Earthquakes of North Eurasia in 2000*. GS RAS, Obninsk, p. 133–143 (in Russian) [Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В. Алтай и Саяны // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 133–143].

Emanov A.F., Filina A.G., Emanov A.A., Fateev A.V., Yarygina M.A., 2004. The Altai-Sayan Region. In: *Earthquakes of North Eurasia in 1998*. GS RAS, Obninsk, p. 116–125 (in Russian) [Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Фатеев А.В., Ярыгина М.А. Алтай и Саяны // Землетрясения Северной Евразии в 1998 году. Обнинск: ГС РАН, 2004. С. 116–125].

Filina A.G., 1999. Earthquakes in the Altai-Sayan Region. In: *Earthquakes of North Eurasia in 1993*. GS RAS, Moscow, p. 65–68 (in Russian) [Филина А.Г. Землетрясения Алтая и Саян // Землетрясения Северной Евразии в 1993 году. М.: ГС РАН, 1999. С. 65–68].

Geological Map of the USSR, 1962. East Sayan Series. Scale of 1:200000. Sheet N-46-XI. Explanatory Note. Moscow, 77 p. (in Russian) [Геологическая карта СССР. Серия Восточно-Саянская. Масштаб 1:200000. Лист N-46-XI: Объяснительная записка. М., 1962. 77 с.].

Geological Map of the USSR, 1968. East Sayan Series. Scale of 1:200000. Sheet N-46-XII. Explanatory Note. Nedra, Moscow, 59 p. (in Russian) [Геологическая карта СССР.

Серия Восточно-Саянская. Масштаб 1:200000. Лист N-46-XII: Объяснительная записка. М.: Недра, 1968. 59 с.].

Geological-Geophysical Study of the Deep Structure of Seismoactive Zones in the Eastern Altai-Sayan Folded Area for Detailed Seismic Zoning, 2005. Information Report on Uncompleted Work Results for 2001–2004. KNIIGiMS, Krasnoyarsk, 698 p. (in Russian) [Геолого-геофизическое изучение глубинного строения сейсмоактивных зон восточной части Алтае-Саянской складчатой области для детального сейсмораионирования: Информационный отчет о результатах незавершенных работ за 2001–2004 гг. Красноярск: КНИИГиМС, 2005. 698 с.].

Geological-Geophysical Study of the Eastern Altai-Sayan Seismic Zone Aimed at Assessing the Seismic Safety of Particularly Important Facilities (HPS, GkhK, Industrial Agglomerations), 2001. Seismological Studies in the Divnogorsk-Krasnoyarsk Area to Update the Map of Seismic Zoning. KNIIGiMS, Krasnoyarsk, 617 p. (in Russian) [Геолого-геофизическое изучение восточной части Алтае-Саянской сейсмической зоны с целью оценки сейсмобезопасности особо значимых объектов (ГЭС, ГХК, промышленные агломерации): Сейсмологические исследования в районе Дивногорска-Красноярска для уточнения карты сейсмического районирования. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. 617 с.].

German V.I., 2021. Energy K-Class System Relationship to Magnitude Scales for the Altai-Sayan Folded Area. In: *Modern Methods of the Seismological Data Processing and Interpretation. Abstracts of the XV International Seismological School (September 6–10, 2021, Novosibirsk)*. GS RAS, Obninsk, p. 26 (in Russian) [Герман В.И. Связь магнитуд и энергетического класса для Алтае-Саянской складчатой области // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XV Международной сейсмологической школы (Новосибирск, 06–10 сентября 2021 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 26].

German V.I., 2025. Assessment of the Underestimation of Seismic Hazard Due to Neglecting the Macroscopic Equation Errors. In: *Modern Methods of Seismic Hazard Assessment and Earthquake Prediction. Proceedings of the IV All-Russian Conference (October 22–23, 2025)*. IEPT RAS, Moscow, p. 38–40 (in Russian) [Герман В.И. Оценка занижения сейсмической опасности вследствие игнорирования погрешностей макросейсмических уравнений // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: Материалы IV Всероссийской конференции (22–23 октября 2025 г.). М.: ИТПЗ РАН, 2025. С. 38–40].

German V.I., Slavsky A.V., 2018. Central and Southern Areas of the Krasnoyarsk Region. In: *Earthquakes of Russia in 2016*. GS RAS, Obninsk, p. 99–101 (in Russian) [Герман В.И., Славский А.В. Центральные и южные районы Красноярского края // Землетрясения России в 2016 году. Обнинск: ГС РАН, 2018. С. 99–101].

Gileva N.A., Kobeleva E.A., Radziminovich Ya.B., Melnikova V.I., Chechelnitzky V.V., 2020. The September 21,

2020, Mw=5.5, Bystraya Earthquake in the Southern Baikal Region: Preliminary Results of Instrumental and Macroseismic Observations. *Problems of Engineering Seismology* 47 (4), 55–71 (in Russian) [Гилёва Н.А., Кобелева Е.А., Радзиминович Я.Б., Мельникова В.И., Чечельницкий В.В. Быстринское землетрясение 21.09.2020 г. (Mw=5.5) в Южном Прибайкалье: предварительные результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 55–71]. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-4>.

Gmelin J.G., 1752. *Reise Durch Sibirien, von Dem Jahre 1738 Bis Zu Ende 1740*. Goettingen, 624 с.

Gusev A.A., Shumilina L.S., 1999. Modeling of the Unit-Magnitude-Distance Relationship Based on the Idea of Extended Incoherent Source. *Volcanology and Seismology* 4–5, 29–40 (in Russian) [Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 29–40].

Imaev V.S., Imaeva L.P., Smekalin O.P., Koz'min B.M., Grib N.N., Chipizubov A.V., 2015. A Seismotectonic Map of Eastern Siberia. *Geodynamics & Tectonophysics* 6 (3), 275–287 (in Russian) [Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Козьмин Б.М., Гриб Н.Н., Чипизубов А.В. Карта сеймотектоники Восточной Сибири // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 3. С. 257–287]. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0182>.

Komarova T.S. (Ed.), 2016. *Memoirs of Ivan Fedorovich Parfentyev (1777–1898): A Manuscript from the Krasnoyarsk Regional Studies Museum's Collection*. Polikor, Krasnoyarsk, 360 p. (in Russian) [Воспоминания Парфентьева Ивана Федоровича (1777–1898): рукопись из фондов Красноярского краевого краеведческого музея / Ред. Т.С. Комарова. Красноярск: Поликор, 2016. 360 с.].

Masarsky S.I., Gorbunova I.V., 1964. Seismicity of Dzhungaria and Altai-Sayan Area. In: *Experimental Seismics*. Institute of Physics of the Earth of the USSR Academy of Science, Moscow, p. 94–137 (in Russian) [Масарский С.И., Горбунова И.В. Сейсмичность Джунгарии и Алтае-Саянской области // Экспериментальная сейсмика. М.: ИФЗ АН СССР, 1964. С. 94–137].

Mushketov I.V., Orlov A.P., 1893. *Earthquake Catalog for the Russian Empire*. Publishing House of the Imperial Academy of Sciences, Saint Petersburg, 582 p. (in Russian) [Мушкетов И.В., Орлов А.П. Каталог землетрясений Российской империи. СПб.: Типография Императорской академии наук, 1893. 582 с.].

New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times to 1975, 1977. Nauka, Moscow, 536 p. (in Russian) [Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 года. М.: Наука, 1977. 536 с.].

Nikiforov P.M. (Ed.), 1938. *Bulletin of Teleseismic Stations of Seismic Network of the USSR*. April 1938. No. 4. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow-Leningrad, 12 p. (in Russian) [Бюллетень телесеизмиче-

ских станций сейсмической сети СССР. Апрель 1938 / Ред. П.М. Никифоров. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1938. № 4. 12с.].

Nikonov A.A., Fleifel L.D., 2014. Forgotten Accounts of Historical Earthquakes in Siberia (17th and 18th Centuries) by J.G. Gmelin. *Russian Geology and Geophysics* 55 (4), 522–529. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.03.010>.

Orlov A.P., 1873. *Earthquakes as a Whole and Earthquakes in South Siberia and Turkistan Region in Particular*. Transactions of the Imperial Kazan University Naturalists' Society. Vol. 3. Iss. 2. Kazan, 99 p. (in Russian) [Орлов А.П. О землетрясениях вообще и землетрясениях Южной Сибири и Туркестанской области в особенности // Труды Общества естествоиспытателей при Императорском Казанском университете. Казань, 1873. Т. 3. Вып. 2. 99 с.].

Perrey A., 1849. Earthquakes in the North of Europe and Asia. In: A. Kupfer (Ed.), *A Set of Magnetic and Meteorological Observations*. No. 2. Headquarters of the Corps of Mining Engineers, Saint Petersburg, p. 205–235 (in Russian) [Перрей А. О землетрясениях на севере Европы и Азии // Свод магнитных и метеорологических наблюдений. 1846 г. / Ред. А. Купфер. СПб.: Изд-во Главного управления корпуса горных инженеров, 1849. № 2. С. 205–235].

Ruzhich V.V., Levina E.A., Smekalin O.P., 2002a. A Probable Scenario for the Development of Seismic Process in the Baikal Rift Zone and East Sayan in 1994–2050. In: *Seismological Monitoring in Siberia and the Far East*. Proceedings of Scientific Session Dedicated to the 100th Anniversary of the "Irkutsk" Seismic Station (December 1–31, 2001). ArtPress, Irkutsk, p. 83–98 (in Russian) [Ружич В.В., Левина Е.А., Смекалин О.П. О возможном сценарии развития сейсмического процесса в Байкальской рифтовой зоне и Восточном Саяне в 1994–2050 годах // Сейсмологический мониторинг в Сибири и на Дальнем Востоке: Материалы научной сессии, посвященной 100-летию сейсмической станции «Иркутск» (1–31 декабря 2001 г.). Иркутск: АртПресс, 2002. С. 83–98].

Ruzhich V.V., Sibgatulin V.G., Smekalin O.P., Strom A.L., Korenevsky A.G., Besprozvannykh A.S., Pilimonkin N.S., Filina A.G., Semenov R.M., 2002b. Strong Earthquakes and Seismic Hazard in Krasnoyarsk and in Its Vicinity. In: *The Physical Basis for Predicting Rock Destruction*. Proceedings of the 1st International School-Seminar (September 9–15, 2001). SibSAU, Krasnoyarsk, p. 229–235 (in Russian) [Ружич В.В., Сибгатулин В.Г., Смекалин О.П., Стром А.Л., Корневский А.Г., Беспрозванных А.С., Пилимонкин Н.С., Филина А.Г., Семенов Р.М. Сильные землетрясения и сейсмическая опасность в г. Красноярске и его окрестностях // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: Материалы 1-й Международной школы-семинара (9–15 сентября 2001 г.). Красноярск: СибГАУ, 2002. С. 229–235].

Savarensky E.F., Solovyov S.L., Kharin D.A. (Eds), 1962. *Atlas of Earthquakes in the USSR. Results from Seismic Observation Networks in the USSR (1911–1957)*. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 336 p.

(in Russian) [Атлас землетрясений в СССР. Результаты наблюдений сети сейсмических станций СССР, 1911–1957 гг. / Ред. Е.Ф. Саваренский, С.Л. Соловьев, Д.А. Харин. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 336 с.]

Seelev I.N., Lekontsev A.V., Khafizov R.R., Peretokin S.A., Panasenko N.N., Sinelshikov A.V., Yakovlev P.V., 2018. Seismic Microundering of the Construction Site of Zheleznogorsk City. *Geology, Geography and Global Energy* 3 (70), 224–264 (in Russian) [Сеелев И.Н., Леконцев А.В., Хафизов Р.Р., Перетокин С.А., Панасенко Н.Н., Синельщиков А.В., Яковлев П.В. Сейсмомикрорайонирование строительной площадки города Железногорска // Геология, география и глобальная энергия. 2018. № 3 (70). С. 224–264].

Sibgatulin V.G., Simonov K.V., German V.I., Peretokin S.A., 2003. Updating Seismic Hazard Assessment for the Krasnoyarsk-Zheleznogorsk-Divnogorsk Agglomeration. In: *Problems of Use and Protection of Natural Resources of Central Siberia. Iss. 4. KNIIGiMS, Krasnoyarsk*, p. 389–395 (in Russian) [Сибгатулин В.Г., Симонов К.В., Герман В.И., Перетокин С.А. Уточнение сейсмической опасности для Красноярск-Железногорск-Дивногорской агломерации // Проблемы использования и охраны природных ресурсов Центральной Сибири. Красноярск: КНИИГиМС, 2003. Вып. 4. С. 389–395].

State Geological Map of the Russian Federation, 2008. *Altai-Sayan Series. Scale of 1:1000000. Sheet N-46 (Abakan). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg*, 391 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Алтай-Саянская. Масштаб 1:1000000. Лист N-46 (Абакан): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. 391 с.]

Study of Seismic Conditions for the Sites of Existing and Under-Construction Hydraulic Structures. A Summary Conclusion on the Expected Seismic Effects for the Krasnoyarsk HPS, 1993. SDI and RI "Gidroproekt", Moscow, 85 p. (in Russian) [Изучение сейсмических условий участков эксплуатируемых и строящихся гидротехнических сооружений: Сводное заключение по расчетным сейсмическим воздействиям для Красноярской ГЭС. М.: ГПИ и НИИ «Гидропроект», 1993. 85 с.]

Ulomov V.I., 2013. General Seismic Zoning of the Territory of Russia – OSR-2012. *Problems of Engineering Seismology* 40 (4), 5–20 (in Russian) [Уломов В.И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-2012 // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40. № 4. С. 5–20].

Ulomov V.I., Bogdanov M.I., Trifonov V.G., Gusev A.A., Gusev G.S., Akaktova K.N., Aptikaev F.F., Danilova T.I. et al., 2016. Explanatory Note to the Set of Maps of General Seismic Zoning of the Russian Federation Territory OSR-2016. *Engineering Surveys* 7, 49–122 (in Russian) [Уломов В.И., Богданов М.И., Трифонов В.Г., Гусев А.А., Гусев Г.С., Акактова К.Н., Аптикаев Ф.Ф., Данилова Т.И. и др. Пояснительная записка к комплексу карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-2016 // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–122].

Ulomov V.I., Medvedeva N.S. (Eds), 2016. *Specialized Earthquake Catalog for North Eurasia in the Context of Problems of General Seismic Zoning of the Territory of Russian Federation. Moscow (in Russian) [Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии для задач общего сейсмического районирования территории Российской Федерации / Ред. В.И. Уломов, Н.С. Медведева. М., 2016]. Available from: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf> (Last Accessed October 24, 2025).]*

Ulomov V.I., Peretokin S.A., Medvedeva N.S., Akatova K.N., Danilova T.I., 2014. *Seismological Aspects of General Seismic Zoning for the Territory of the Russian Federation Territory (Maps OSR-97, OSR-2012, OSR-2014. Problems of Engineering Seismology* 41 (4), 5–24 (in Russian) [Уломов В.И., Перетокин С.А., Медведева Н.С., Акатова К.Н., Данилова Т.И. Сейсмологические аспекты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (карты ОСР-97, ОСР-2012, ОСР-2014) // Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. Т. 41. № 4. С. 5–24].

Ulomov V.I., Shumilina L.S., 1999. *A Set of Maps of the Russian Federation General Seismic Zoning – GSZ-97. Scale 1:8000000. Explanatory Note and a List of Cities and Settlements Located in Seismically Hazardous Areas. United Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow*, 57 p. (in Russian) [Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000: Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.]

Updating Initial Seismicity Score and Seismic Microzoning (SM) of Location Site of HS of the Krasnoyarsk HPS. *Technical Report, 2022. KNIIGiMS, Krasnoyarsk*, 144 p. (in Russian) [Уточнение исходной сейсмичности и сейсмическое микрорайонирование (СМР) площадки расположения ГТС Красноярской ГЭС: Технический отчет. Красноярск: КНИИГиМС, 2022. 144 с.]

Updating Initial Seismicity Score for the GKkH Facilities, 2002. KNIIGiMS, Krasnoyarsk, 133 p. (in Russian) [Уточнение исходного балла сейсмической опасности для объектов ГХК. Красноярск: КНИИГиМС, 2002. 133 с.]

Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I., 2022. *The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): The Ontology and Design Behind the Continental-Scale Dataset. Earth System Science Data* 14 (10), 4489–4503. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>.

Zhalkovsky N.D., Muchnaya V.I., 1975. *Strong Earthquake Catalog for the Altai-Sayan Area ($K \geq 12$; $M \geq 4.5$). In: V.N. Gaisky (Ed.), Seismicity of the Altai-Sayan Area. Collection of Research Papers. Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk*, p. 15–27 (in Russian) [Жалковский Н.Д., Мучная В.И. Каталог сильных землетрясений Алтай-Саянской области ($K \geq 12$; $M \geq 4.5$) // Сейсмичность Алтай-Саянской

области: Сборник научных трудов / Ред. В.Н. Гайский. Новосибирск: ИГиГ АН СССР, 1975. С. 15–27].

Zhalkovsky N.D., Muchnaya V.I., 1993. Returning to the Issue of the 1806 Catastrophic Earthquake in Krasnoyarsk. In: Seismicity and Seismic Zoning of North Eurasia. Vol. 1. United Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, p. 135–138 (in Russian) [Жалковский Н.Д., Мучная В.И. По следам сообщения о катастрофическом землетрясении в г. Красноярске 1806 г. // Сейсмичность и сейсмиче-

ское районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ, 1993. Вып. 1. С. 135–138.]

Zhalkovsky N.D., Zelenkov P.Ya., Muchnaya V.I., Arzhannikov S.G., 1992. Report on the Clarification of Seismic Conditions in the Area of the Krasnoyarsk HPS. SB RAS, Novosibirsk, 71 p. (in Russian) [Жалковский Н.Д., Зеленков П.Я., Мучная В.И., Аржанников С.Г. Отчет по теме: Уточнение сейсмических условий района Красноярской ГЭС. Новосибирск: СО РАН, 1992. 71 с.]