

КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО БАЙКАЛА НА ЕГО ПОБЕРЕЖНЫЕ ТЕРРИТОРИИ

В.И. Джурик, Е.В. Брыжак[✉], С.П. Серебrenников, А.Н. Шагун, А.Ю. Ескин

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

Поступила в редакцию: 28.12.2024

Принята в печать: 05.03.2025

Опубликована онлайн: 09.03.2025

DOI: 10.15372/GIG2025117

EDN: LHKVRB

Ссылка для цитирования:

Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебrenников С.П., Шагун А.Н., Ескин А.Ю.

(2025). Комплексная геолого-геофизическая оценка сейсмических воздействий сильных землетрясений Центрального Байкала на его бережные территории // Геология и геофизика, т. 66, № 8, с. 1068–1082, DOI: 10.15372/GIG2025117, EDN: LHKVRB.

© В.И. Джурик, Е.В. Брыжак, С.П. Серебrenников, А.Н. Шагун, А.Ю. Ескин, 2025

[✉]E-mail: bryzhak@crust.irk.ru

При использовании комплекса геофизических, сейсмодектонических, инженерно-сейсмологических исследований и предложенных методических подходов дана оценка сейсмических воздействий на различных уровнях районирования сейсмической опасности территорий Центрального Байкала. Реализованные подходы обоснованы выделением зон вероятного возникновения сильных землетрясений и уточнением их основных показателей, необходимых для наиболее обоснованного задания исходных сигналов, отвечающих параметрам прогнозируемых сильных землетрясений. За основу достоверности выбранных подходов и методов в отношении уточнения исходной сейсмичности приняты проявления на исследуемой территории зарегистрированных ранее относительно сильных землетрясений, а также в направлении районирования сейсмической опасности конкретных территорий на вероятностной основе вполне оправданно приняты зарегистрированные сведения о поведении бережных водонасыщенных массивов рыхлых отложений по данным записей местных землетрясений. Реализованные подходы при использовании комплекса геофизических методов на исследуемых территориях позволяют совершенствовать способы прогноза максимальных сейсмических воздействий для различного состояния грунтов с целью получения для них набора сейсмических характеристик в виде акселерограмм, спектров ускорений, частотных кривых и их параметров, необходимых для проектирования сейсмостойких сооружений на бережных территориях оз. Байкал. Исследования, выполненные в таком направлении, представлены на примере площадки, расположенной в пределах сейсмически активной юго-восточной части Центрального Байкала, и на худших грунтовых условиях в отношении проявления сейсмичности на его бережных территориях.

Сейсмические воздействия, исходная сейсмичность, землетрясения, сейсмическое микро-районирование, акселерограммы, частотные характеристики, спектры, ускорения, резонансные частоты, побережье оз. Байкал

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Территория побережья Центрального Байкала расположена в пределах высокоактивной в сейсмическом отношении Байкальской рифтовой зоны (рис. 1). Под этой территорией понимается суша, прилегающая к воде. На ней расположены города, населенные пункты, лечебно-оздоровительные комплексы и курорты. Строительство причалов, гостиничных комплексов, туристических баз и других сопутствующих гражданских и промышленных сооружений в дальнейшем будет только увеличиваться. Все они по расположению тяготеют к прибрежным и бережным территориям озера, которые характеризуются высокой сейсмической опасностью [ОСР-2015, 2015], и в большинстве случаев это худшие по сейсмическим свойствам водонасыщенные рыхлые грунты.

Учитывая сказанное, основная цель работ связана с прогнозом сейсмических воздействий на различных уровнях районирования сейсмической опасности на примере участка исследований в районе п. Тур-

ка, расположенного в юго-восточной части побережья Центрального Байкала. Задачей исследований является совершенствование методов и подходов районирования сейсмической опасности бережных территорий оз. Байкал при использовании геофизических и сейсмодектонических данных. Сам подход к прогнозу сейсмических воздействий сильных землетрясений для конкретных территорий включает необходимость уточнения исходной сейсмичности (УИС) в рамках проведения детального сейсмического районирования (ДСР) и конкретно на утвержденной карте общего сейсмического районирования [ОСР-2015, 2015]. Завершающим этапом является проведение сейсмического микрорайонирования (СМР) исследуемой территории в масштабе строительства [Строительство..., 2018].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При общих разработанных подходах к районированию сейсмической опасности специфика отдель-

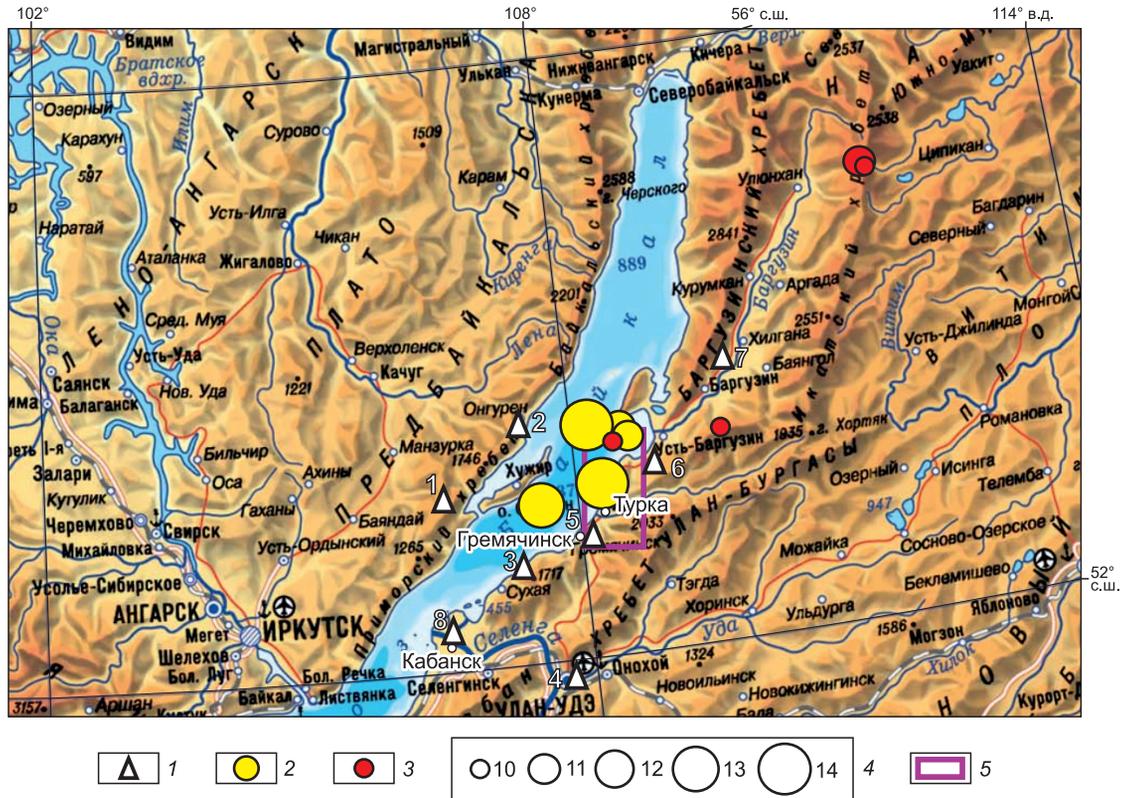


Рис. 1. Обзорная карта исследуемого района Центрального Байкала с указанием эпицентров зарегистрированных землетрясений, записи которых были использованы в настоящей работе. 1 – стационарные сейсмические станции: 1 – Тырган, 2 – Онгурены, 3 – Заречье, 4 – Улан-Удэ, 5 – Котокель, 6 – Максимиха, 7 – Суво, 8 – Кабанск; 2 – эпицентры зарегистрированных землетрясений стационарными сейсмостанциями (M_p от 10.6 до 14.5) в период с 2002 по 2011 г.; 3 – эпицентры зарегистрированных землетрясений передвижными сейсмостанциями (M_p от 9.4 до 11.3) в октябре 2019 г.; 4 – энергетический класс (K); 5 – район исследований.

ных прибрежных и побережных территорий по сейсмичности, строению, ее расположению к зонам вероятных очагов землетрясения (ВОЗ), сейсмо-климатическим зонам и акваториям оз. Байкал требует комплексного подхода к ее обоснованию [Джурик и др., 2022]. Если сравнить конкретные решаемые задачи на различных уровнях районирования сейсмической опасности для юго-восточной части побережья Центрального Байкала для ОСР, ДСР-УИС и СМР, то окажется, что они в значительной степени перекрываются и действительно требуют детализации при переходе от ОСР к СМР. Это, прежде всего, вероятность сильных землетрясений, оценка параметров очагов, изучение зон ВОЗ, прогноз сейсмических воздействий и оценка поведения грунтовых массивов при сильных землетрясениях. Также отмечается, что принципы учета грунтовых условий имеют существенное значение на всех указанных выше уровнях районирования сейсмической опасности, т. е. не только для СМР, что очевидно, но также и для ОСР и ДСР, поскольку с ними связана последовательность дальнейшего определения установленного уровня сейсмической опасности при ОСР для конкретных сейсмогрунтовых моделей исследуемых

территорий с последующим их уточнением для УИС и СМР [Алешин, 2017].

Для УИС это связано с необходимостью получения данных о сеймотектонической обстановке в районе строительства, расчета сейсмического режима (повторяемости землетрясений) в данном пункте и районирования сейсмической опасности территории, отнесенной к определенным грунтовым условиям [Гриб и др., 2024]. Для этого на основе сеймотектонических исследований предполагается установление зон ВОЗ в виде определенных сейсмогенных разломов и использование данных о моделях изосейст [Бунэ, Катрих, 1980; Сейсмическое районирование..., 1980].

Для проведения СМР применяется комплекс инженерно-сейсмологических методов: сейсмических жесткостей, амплитудно-частотный, микросейсм и расчетные [Оценка..., 1988]. В результате для получения исходных данных, необходимых для расчетов по каждому из указанных методов, в нашем случае проведены электроразведочные и сейсморазведочные измерения, регистрация землетрясений и микросейсм.

Электроразведочные измерения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) выпол-

нены по стандартным методикам [Электроразведка, 1980; Огильви, 1990], использована аппаратура «Электротест-РБ» (НТК «Диоген», Россия, 2018 г.), точность измерений была не менее 5 %. Для максимально принятых разносов ($AB/2 = 500$ м) при благоприятных геоэлектрических условиях изучалось распределение электрических сопротивлений на глубину до 130 м. Количественная оценка истинных сопротивлений – до 150 м.

Сейморазведочные измерения методом преломленных волн [Сейморазведка, 1981] выполнялись 24-канальной компьютеризированной цифровой станцией «Лакколит» (Россия). Длина годографов достигала 92 м. Для увеличения глубины зондирования использовались нагоняющие годографы. Наблюдения проводились с возможностью накопления и регистрации продольных и поперечных волн. Такая методика измерений позволяет получать средние значения скоростей в верхней зоне разреза до глубины тридцать и более метров. Скорости сейсмических волн в «эталонных» коренных породах измерялись в районе исследований на выходах коренных пород (их обнажениях).

Расчет сейсмической опасности при использовании измеренных значений скоростей сейсмических волн по методу сейсмических жесткостей проводился по формуле С.В. Медведева [1962]:

$$\Delta I = 1.67 \lg \left(\frac{\rho_3 v_3}{\rho_i v_i} \right) + R e^{-0.04 h^2}, \quad (1)$$

где $\rho_3 v_3$ и $\rho_i v_i$ – сейсмические жесткости эталонного и исследуемого грунтов, ΔI – расчетные значения приращений балльности, h – глубина залегания уровня грунтовых вод.

Коэффициент R для территорий, где преобладают песчаные и глинистые грунты, принимается равным 1, а где гравийно-галечные и крупнообломочные – 0.5. Он характеризует влияние состава грунтов на приращение балльности за счет их водонасыщения. В этом случае при расчетах приращений по формуле (1) скорости продольных волн для водонасыщенных слоев берутся для таких же по составу грунтов, но находящихся в воздушно-сухом состоянии [Оценка..., 1988].

При расчетах средневзвешенного значения $\rho_i v_i$, учитывая дискуссионное состояние вопроса о принимаемой толще верхней части грунтового массива [Оценка..., 1988; ОСП-2015, 2015; Строительство..., 2018], брался 10- и 30-метровый слой от планировочной отметки. Это связано с возможностью сравнительного анализа для получаемых расчетных данных.

Регистрация землетрясений и микросейсм проведена при использовании многоканальной цифровой сейсмической станции «Байкал-7HR» с трехкомпонентными сейсмоприемниками СК-ПП. Применяемая аппаратура обеспечивала динамический диапазон 96

дБ в полосе частот от 0.1 до 300 Гц в режиме регистрации скорости перемещений. Для получения необходимой статистической надежности в оценке уровня и спектрального состава микроколебаний регистрация в каждом пункте измерения велась не менее 15 мин. При этом регистрировались колебания в двух горизонтальных плоскостях X и Y , ориентированных на север и восток и в вертикальной плоскости Z .

Для расчетов сейсмической опасности по методам микросейсм и амплитудно-частотному (АЧМ) основное внимание уделялось использованию основных параметров расчетных и экспериментальных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) согласно выражению:

$$\Delta I = K \lg U_{\max}, \quad (2)$$

где K – эмпирический коэффициент, для землетрясений он равен 3.3 [Медведев, 1962], а для микросейсм – 2, согласно [Еманов и др., 2008]. U_{\max} для записей микросейсм определяется способом спектральных отношений [Nakamura, 1989; Ibs-von Seht, Wohlenberg, 1999] и рассчитывается по отношению между спектрами горизонтальных (H_{NS} и H_{EW}) и вертикальных (H_z) компонент в каждом пункте измерений. Для землетрясений это отношение максимальных значений частотных характеристик (U_{\max}) или отношение зарегистрированных максимальных амплитуд (A_i/A_3) для горизонтальных компонент на исследованных и эталонных грунтах [Оценка..., 1988].

Проведение теоретических расчетов основано на использовании известных программ расчетов колебаний на поверхности и во внутренних точках среды, основанных на использовании линейной теории упругости, согласно методу тонкослоистых сред [Ратникова, 1984]. В этом случае моделируются слабые сейсмические воздействия (при исходной сейсмичности < 7 баллов). Для сейсмических воздействий > 7–8 баллов расчеты также проводятся в предположении упругого деформирования (т. е. вся энергия уходит на упругие деформации), а возникающие остаточные деформации могут определяться по шкалам балльности по величинам расчетных значений максимальных смещений, ускорений или скоростей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Уточнение исходной сейсмичности связано с реализацией указанных выше подходов: оно включает сведения о сеймотектонической обстановке в районе строительства, данные графиков повторяемости сейсмических событий и их проявлений для исследуемого региона. Сеймотектоническая обстановка территории, расположенной на юго-западе активизированной окраины Сибирской платформы, в основном определяется Морским разломом ($M = 7.5$). Раз-

лом (сброс) имеет общую протяженность до 180 км (кайнозой). При относительно высокой сейсмической активности в пределах активной части разлома выявлены сейсмические события до 8 баллов. На фрагменте карты эпицентров землетрясений Центрального Прибайкалья (рис. 2, а) выделены (вместе с Морским разломом) сейсмически активные структуры – Хаимский и Ольхонский разломы, где расположены эпицентры инструментальных и исторических землетрясений ($M \geq 3.6$). Эпицентры современных землетрясений с магнитудой 5.3 расположены в зоне Морского разлома: Максимихинское (20.05.2008 г.) и Туркинское (16.07.2011 г.) [Имаев и др., 2015].

В эпицентральной области Максимихинского землетрясения присутствуют обновленные либо вновь образованные разрывные нарушения субмеридиональной или субширотной ориентации. Последнее направление подчеркивается морфоструктурными особенностями м. Крестовый – ярко выраженной тектонической обособленностью крупного блока, возможно, контролируемого сдвигами.

Сейсмотектоническая позиция Туркинского землетрясения оказалась более изученной. В тектоническом строении территории, примыкающей к восточному побережью оз. Байкал, разрывные нарушения играют весьма заметную роль. ими контролируется конфигурация небольших межгорных эмбриональных впадин байкальского типа, сложенных современными и четвертичными отложениями и выстраивающихся в цепочку в виде отдельных грабенов шириной в первые километры и длиной около 10–15 км. Указанная система структурных нарушений протягивается в главном для всех впадин Байкальской рифтовой зоны северо-восточном направлении. Отмечается, что различие в сценариях развития очаговых областей двух сильных ($M_w = 5.3$) землетрясений Среднего Байкала в 2008 и 2011 гг. тесно связано с геолого-структурными особенностями районов их локализации.

На основе анализа сейсмотектонических данных были установлены зоны ВОЗ в виде определенных сейсмогенных разломов (см. рис. 2, а). Для перехода от выделенных зон ВОЗ с прогнозными M_{\max} и далее к районированию сотрясений различной силы наиболее приемлемыми являются данные о моделях изосейст [Бунэ, Катрих, 1980; Сейсмическое районирование..., 1980]. В нашем случае связь основных параметров изосейст сильных землетрясений с их магнитудой для Монголо-Байкальского региона представлена на рис. 2, б. Она показывает, что для выделенных зон ВОЗ исследуемой территории отмечаются следующие полученные количественные зависимости для короткой оси изосейст. Для магнитуды, равной 7, значения спадания балльности с расстоянием до 15 км от эпицентра – до 9 баллов, до 48 км – 8 баллов и далее до 120 км – 7 баллов. Для магнитуды, равной 6.5, значения спадания балльно-

сти до 30 км от эпицентра – 8 баллов, до 78 км – 7 баллов. Для магнитуды, равной 6 – 8 баллов до 14 км и 7 баллов до 40 км (см. рис. 2, б). Отношение короткой оси изосейст к максимальной изменялось от 3:1 для 9-балльных изосейст до 2:1 для 8-балльных и 1.5:1 для 7-балльных [Чипизубов, 2016].

Проведенные сейсмотектонические исследования позволили построить карту уточненной исходной сейсмической опасности (УИС) района территории исследований. Технология построения карты кратко заключалась в следующем. Согласно установленным закономерностям затухания сейсмических волн с расстоянием от землетрясений определенной магнитуды (см. рис. 2, б), были проведены расчеты местоположения изосейст определенной балльности по шкале MSK-64. На карте сейсмотектоники района исследований выделены сейсмогенные разломы, находящиеся вблизи площадки исследований и установлены их предельные магнитуды, т. е. выделены зоны ВОЗ с магнитудой 6.0 и 6.5, которым соответствует сейсмическая опасность 8 и 9 баллов (см. рис. 2, в).

В результате в рамках уточнения исходной сейсмичности вполне обоснованно для исследуемой территории выделена опасная зона с более высокой сейсмической опасностью, равной 9 баллам. Она объединяет Кика-Туркинскую систему впадин и одноименную зону разломов и подтверждается современными землетрясениями. Вся территория пос. Турка входит в выделенную 8-балльную зону ($M = 6$) и попадает, согласно карте, в область 7.9–8.0 баллов интенсивности, что должно быть принято для него в качестве уточненного уровня сейсмической опасности по сейсмотектоническим данным.

В подтверждение принятой сейсмичности конкретно для участка представилась возможность построить график сейсмического режима (см. рис. 2, г). Последний реализован по имеющимся макросейсмическим сведениям для территории п. Турка [Голенецкий, 1997; Чипизубов и др., 2009] и устанавливает соотношение времени T (между землетрясениями) и силы толчка в баллах, согласно табл. 1.

Выборка землетрясений проводилась из специализированного каталога [СКЗ ОСР-2012, 2012] и данных каталога Байкальского филиала Единой геофизической службы (ЕГС) РАН [2024], с пересчетом сейсмического воздействия в баллах (I) по формуле [Голенецкий, 1997]:

$$I = 1.5M - 4 \lg \sqrt{(\Delta^2 + H^2)} + 4, \quad (3)$$

где M – магнитуда, Δ – расстояние (км), значение глубины гипоцентра везде 10 км.

В итоге для землетрясений силой 7 баллов использовалось 2 события, для 6 баллов – 10, для 5 баллов – 28. Период времени – с 1769 г.

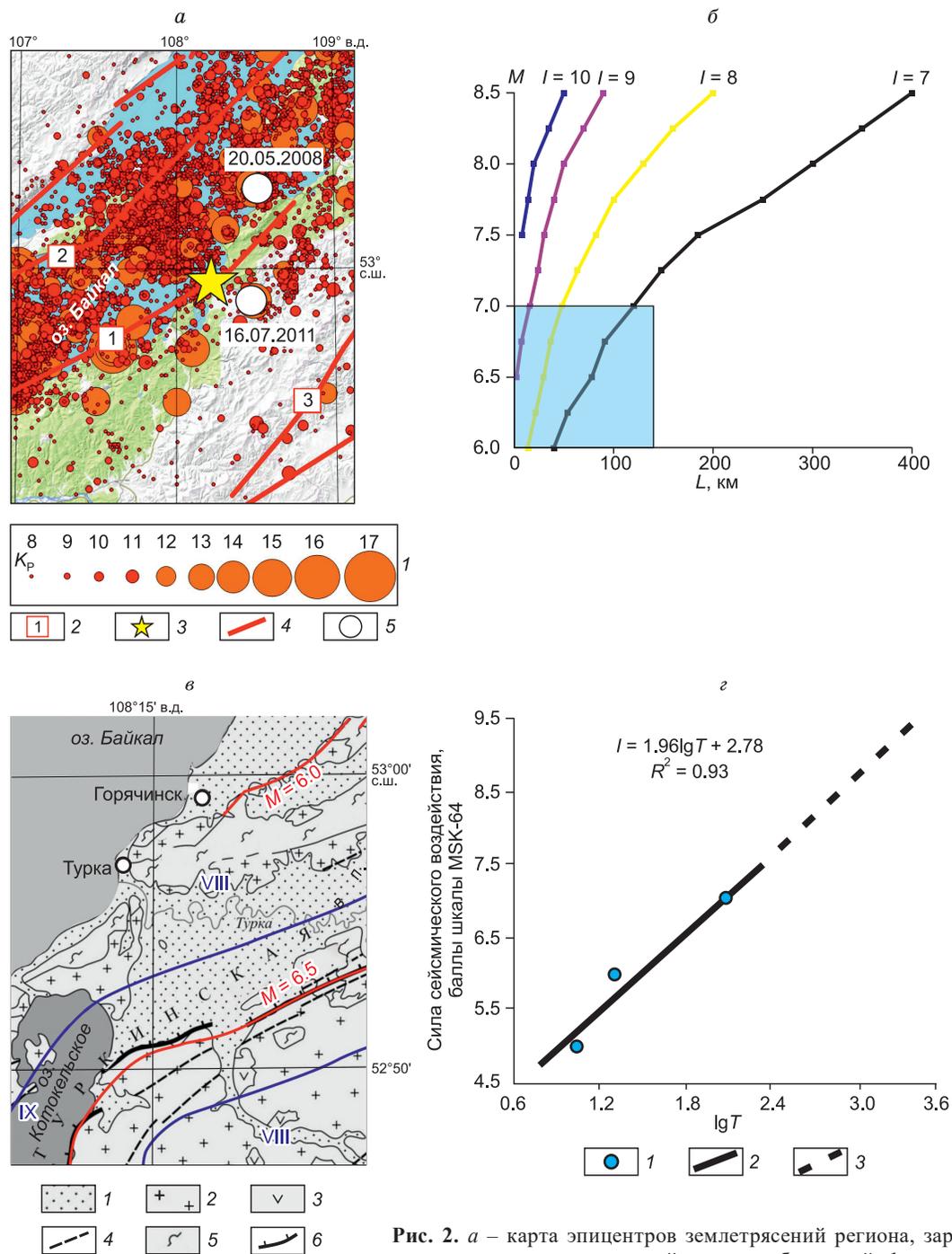


Рис. 2. а – карта эпицентров землетрясений региона, зарегистрированных за инструментальный период наблюдений: 1 – эпицентры зарегистрированных землетрясений; 2 – сейсмически активные разломы (1 – Морской, 2 – Ольхонский, 3 – Хаиминский); 3 – участок геофизических наблюдений в пределах п. Турка; 4 – сейсмически активные разломы; 5 – эпицентры Максимилинского (20.05.2008 г.) и Туркинского (16.07.2011 г.) землетрясений.

б – связь основных параметров моделей изосейст сильных землетрясений с их магнитудой для Монголо-Байкальского региона (M – магнитуда, L – короткая ось изосейст (км), I – интенсивность в баллах), выделенная синим цветом область графика – основные количественные данные, использованные для уточнения исходной сейсмичности. в – карта УИС с выделением зон ВОЗ ($M = 6.0$ и 6.5) и сейсмическим районированием в баллах: 1 – четвертичные отложения впадин и речных долин; 2 – протерозойско-нижнепалеозойские граниты; 3 – нижнепротерозойские и нижнепалеозойские габбро и диориты; 4 – зоны милонитизации и катаклаза; 5 – архейские кристаллические сланцы, плагиогнейсы, амфиболиты, мраморы, кварциты; 6 – уступ в современном рельефе, связанный с развитием Кика-Туркинской впадины. г – график сейсмического режима, зависимость логарифма промежутка времени (T) между землетрясениями и силой землетрясений в баллах (I) за период времени с 1769 г.: 1 – значения узлов графика повторяемости, полученные по макросейсмическим данным и отражающие соотношение времени T (между землетрясениями) и силы толчка в баллах; 2 – линия, аппроксимирующая узлы графика повторяемости; 3 – прямая, экстраполированная для получения расчетных соотношений времени между толчками и соответствующей им балльности. R^2 – коэффициент детерминации.

Таблица 1. К построению графика сейсмического режима для п. Турка

<i>I</i>	<i>T</i> , год	lg <i>T</i>
8.1	500	2,69
7	120	2,07
6	22	1,34
5	12	1,07

Примечание. *I* – балльность, *T* – время между толчками. Полу жирным шрифтом выделена расчетная величина для п. Турка.

График свидетельствует о следующем: для интервала времени *T* = 500 лет *I* = 8.1 балла. Следовательно, по полученным данным по изложенному подходу, согласно [Методические рекомендации..., 2004; ОСР-2015, 2015; Транспортные сооружения..., 2017] и с учетом сейсмогеологических данных (см. рис. 2, а), с заданной вероятностью не превышения (90 % за 50 лет) в пункте исследований могут происходить толчки силой 7.9–8.1 балла с периодом повторяемости 500 лет (10 %-я вероятность превышения расчетной интенсивности в течение 50 лет). Необходимо отметить, что продление установленной зависимости за 8 баллов является не совсем корректной процедурой, поскольку нет сведений макросейсмического ха-

рактера и данных по зарегистрированным сильным сейсмическим событиям.

Указанная величина исходной сейсмичности для территории п. Турка является вполне обоснованной и не противоречит установленным правилам по ее уточнению, согласно представленным сейсмологическим и сейсмогеологическим данным. Все дальнейшие расчеты проведены относительно исходной сейсмичности, равной 8 баллам (*T* = 500 лет), для средних грунтовых условий. Возможные изменения сейсмических воздействий от принятого уровня сейсмичности (8 баллов для средних грунтов) определяются местными условиями площадки и обосновываются следующим образом.

СМР при использовании указанных выше методов позволило оценить сейсмическую опасность территории строительства, которая занимает площадь около 70 000 м² и характеризуется худшими сейсмогрунтовыми условиями на побережных территориях Среднего Байкала в баллах и в максимальных ускорениях (рис. 3). В инженерно-геологическом отношении разрез площадки является типичным для побережных территорий бассейнов и устьев рек оз. Байкал. По данным бурения и малоглубинной геофизики, он представлен комплексом рыхлых отложений. Сверху идут средне- и крупнозернистые пески мощ-



Рис. 3. Общая схема инструментальных измерений на участке исследований (обозначен звездочкой на рис. 2, а). 1 – граница участка работ, 2 – точка сейсмозондирования и ее номер, 3 – точка регистрации микросейсм и ее номер, 4 – точка ВЭС и ее номер.

ностью 20 м и более с включениями дресвы и гальки, ниже – гравийно-галечные отложения, средняя плотность 2.03 г/см³. Общая мощность рыхлых отложений от 60 до 80 м. Полное водонасыщение грунтов отмечено с глубины от 1 до 3 м, в отдельных случаях с 4.8 м. Скальные грунты представлены в основном гранитами, имеющими различную степень трещиноватости и разрушения.

На площадке геофизические измерения выполнены по густой сети (см. рис. 3). Измерения вне площадки были необходимы для уточнения строения и сейсмических свойств эталонных и средних грунтов. Это важно для представления площадки в виде сейсмогрунтовых моделей и проведения теоретических расчетов. Расчетные величины изменений сейсмических воздействий от принятого уровня сейсмичности (8 баллов, карта «А», $T = 500$ лет) для средних грунтов обосновываются по данным геофизических измерений последовательно для каждого из выбранных методов.

Электроразведочные измерения использовались для более детального изучения верхней части геологического разреза до кровли коренных пород. В результате геоэлектрический разрез площадки, по данным ВЭЗ (V1–V6, см. рис. 3), сверху до 2–3 м характеризуется значениями сопротивлений от 150 до 300 Ом·м. Это может быть связано с разной степенью влажности слоя сезонного промерзания, представленного песками. Ниже идет слой с 3 до 60–70 м, сложенный средне- и крупнозернистыми водонасыщенными гравелистыми песками с изменяющимся значением УЭС от 400 до 800 Ом·м. Далее до 130 м располагается слой с УЭС 1200 Ом·м, представленный коренными, сильно разрушенными породами. Глубже 130 м залегают прочные слабовыветрелые породы с УЭС 19 000 Ом·м и более, которые можно отнести к относительно сохранным коренным породам.

Сейсморазведочными измерениями выполнено непосредственно на площадке исследований 10 сейсмозондирований и 6 для изучения «эталонных» скальных и средних грунтов. Для расчетов использовались полученные нами ранее данные по скоростям сейсмических волн для исследуемого района, приведенные в работах [Джурик и др., 2013, 2015]. Результаты определения скоростей в конкретных точках зондирований, согласно схеме работ (см. рис. 3), сведены в табл. 2. Практически повсеместно до глубины 20–30 м выделяются три слоя. По мощности и скоростям в верхней зоне разреза они достаточно выдержанны.

Верхний слой от 2 до 4 м имеет значения v_p от 300 до 420 м/с. Низкие значения скоростей обусловлены слоем сезонного промерзания. Подстилающий слой от 5.5 до 7.0 м представлен средне- и крупнозернистыми водонасыщенными грунтами. Скорости сейсмических волн в нем меняются в небольших пределах от 1530 до 1690 м/с – v_p и от 240 до 390 м/с – v_s . Ниже залегают крупнозернистые и гравелистые во-

донасыщенные пески, их мощность более 30 м, скорости $v_p = 1710–1810$ м/с и $v_s = 280–440$ м/с.

Дальнейшее использование полученных сведений о скоростях v_p и v_s в грунтовых слоях для расчетов приращений сейсмической балльности требует задания эталонных значений. Для этого нами проведены их измерения на участках близкого залегания коренных пород от поверхности (S12–S16, см. рис. 3), расположенных вблизи исследуемой территории. Наиболее сохранные коренные породы на выбранных участках залегают с глубины 3–20 м. Скорости сейсмических волн в них меняются от 1649 до 2480 м/с – v_p и от 830 до 1290 м/с – v_s . Далее с глубиной в коренных породах скорости быстро увеличиваются и на глубине 10–20 м могут достигать 2400 м/с – v_p и 1290 м/с – v_s . Учитывая представленные данные о скоростях в коренных породах и полученные ранее в районе исследования [Джурик и др., 2013], вполне обоснованно за эталон принимаются наиболее вероятные их значения, равные 2000 м/с – v_p и 1050 м/с – v_s . Объемная масса этих грунтов, по инженерно-геологическим данным, близка к 2.5 т/м³. Сейсмическая опасность участков с такими значениями скоростей принимается равной 7 баллам.

Таким образом, для проведения расчетов сейсмической опасности получены все необходимые данные о составе грунтов, скоростях распространения в них сейсмических волн, мощности рыхлых отложений, уровне залегания грунтовых вод (УГВ) и объемной массе грунтов. Отмечается, что для водонасыщенного слоя песков вполне обоснованно при расчетах по представленной выше формуле (1) коэффициент K принят равным 1. Данные выполненных расчетов приращений балльности, согласно изложенной выше методике, на момент исследований сведены в табл. 2. Из нее для расчетов взяты измеренные значения скоростей в водонасыщенных грунтах. При таком подходе расчетные значения скоростей в верхнем неводонасыщенном слое до 8–10 м на площадке меняются от 447 до 628 м/с, в нижележащем слое до 30 м – от 639 до 750 м/с. В общем, эти значения характерны для средних грунтовых условий Байкальского региона [Джурик и др., 2022].

В результате расчетов приращения балльности по отношению к коренным породам по скоростям продольных и поперечных волн меняются от 1.63 до 1.99. Сейсмическая опасность на момент исследования находится в пределах 8.63–8.99 баллов. Расчетный уровень грунтовых вод определяется на основании данных бурения и находится на отметке 457 м, соответствующей уровню оз. Байкал. В этом случае для исследуемой площадки глубина его залегания меняется от 1 до 2 м от поверхности, а приращение балльности за счет глубины залегания УГВ будет находиться в пределах от 0.85 до 0.96 баллов.

Расчеты по принятой методике показывают, что для установленного прогнозного УГВ приращение

Таблица 2. Скорости сейсмических волн в пунктах зондирования и результаты оценки приращений балльности на исследуемом участке по методу сейсмических жесткостей на момент исследований

№ п/н	h , м	v_p	v_s	УГВ, м	$\Delta I_{\text{УГВ}}$	ΔI_{v_p}	ΔI_{v_s}
		м/с			баллы		
S1	3.5	320	–	3.5	0.62	1.72	1.76
	5.5	1690	280				
	–	1810	340				
S2	3.5	300	–	3.5	0.62	1.72	1.76
	5.5	1650	270				
	–	1800	320				
S3	4	350	–	4	0.57	1.63	1.67
	5	1620	390				
	–	1780	470				
S4	3	330	–	3	0.7	1.81	1.84
	7	1550	240				
	–	1740	300				
S5	3	300	–	3	0.7	1.81	1.84
	7	1530	240				
	–	1810	330				
S6	3.5	310	–	3.5	0.62	1.72	1.76
	5.5	1560	240				
	–	1710	290				
S7	2	350	–	2	0.85	1.96	1.99
	6	1500	360				
	–	1700	440				
S8	2	420	–	2	0.85	1.96	1.99
	7	1650	270				
	–	1750	290				
S9	2.5	380	190	2.5	0.78	1.88	1.92
	5.5	1590	240				
	–	1710	280				
S10	2.5	300	–	2.5	0.78	1.89	1.92
	6.5	1610	250				
	–	1770	290				

Примечание. п/н – пункт наблюдения. Здесь и в табл. 3: h – мощность слоя; v_p и v_s – скорости распространения продольных и поперечных волн соответственно. $\Delta I_{\text{УГВ}}$ – приращение балльности, рассчитанное по поправке на УГВ; ΔI_{v_p} и ΔI_{v_s} – приращение балльности, полученное методом сейсмических жесткостей по скоростям продольных и поперечных волн соответственно. Прочерк – нет данных.

балльности для эффективной мощности, равной 10 м, находится в пределах от 1.95 до 2.16, а для 30-метрового слоя – от 1.85 до 2.06 баллов. Сейсмическая опасность площадки в первом случае достигает значений 8.95–9.16 балла и во втором – 8.85–9.06. По сравнению с данными табл. 2, различия в сейсмической опасности практически полностью коррелируются с различием глубины залегания УГВ (на момент исследования и прогнозного). Площадка, по методу сейсмических жесткостей, оценивается как однородная по сейсмической опасности, которая меняется от среднего на ± 0.15 балла по каждому из двух вариантов расчета, т. е. находится в пределах погрешности их определения. Различие между самими вариантами оценивается в 0.1–0.3 балла. Снижение сейсмической опасности при использовании средних скоростей в 30-метровом слое, по сравнению с 10-метровым слоем, вполне объяснимо. Оно связано с выравниванием средних значений v_p и v_s с увеличением эффективной

мощности слоя и тем, что на максимальные амплитуды при землетрясениях основное влияние оказывает самая верхняя зона разреза.

За короткий период наблюдений временной сейсмической станцией были зарегистрированы четыре землетрясения. Регистрировались трехкомпонентные записи скоростей колебаний грунта. Их основные параметры: энергетический класс ($K = 9.4–11.3$) и эпицентральные расстояния ($\Delta = 56.5–316.7$ км). Но для решения наших инженерно-сейсмологических задач было отобрано самое близкое из них ($\Delta = 56.5$ км, $K = 9.5$). Оно произошло в зоне с высокой плотностью землетрясений, в конечной ветви Морского разлома (см. рис. 1, 2), южнее п-ова Святой Нос. Диапазон регистрируемых скоростей для трех компонент составлял от 40 до 80 мкм/с (рис. 4, а).

Станция располагалась в пункте наблюдения М0 (см. рис. 3), на постаменте, на глубине 2 м от поверхности – это практически на глубине заложения фун-

даментов и прогнозируемого УГВ, что имеет существенное значение для использования данных регистрации землетрясений, полученных прямым методом СМР [Оценка..., 1988]. Для выбранного землетрясения трехкомпонентные записи велосиграм (двух горизонтальных и одной вертикальной компонент) показаны на рис. 4, а. Для них представлены несглаженные расчетные спектры (см. рис. 4, б) и частотная характеристика (см. рис. 4, в). Спектры показывают, что их видимые максимумы могут различаться в 2–6 и более раз, и они приходятся на диапазон частот от 1 до 10 Гц, но наибольшие изменения приходятся на низкие частоты. Более наглядно это подтверждает АЧХ слоя рыхлых отложений в пункте регистрации землетрясений. Она рассчитана по отношению спектров зарегистрированного землетрясения по двум горизонтальным компонентам *NS* и *EW* и вертикальной компоненте *Z* [Nakamura, 1989]. Ее основной максимум приходится на частоту, близкую к 1.6 Гц. Выделяются и побочные максимумы на относительно высоких частотах 7–8 и 10–11 Гц (см. рис. 4, в).

Регистрация микросейсм выполнена непосредственно на площадке исследования в десяти пунктах

и семи вблизи площадки (см. рис. 3). Пункты регистрации располагались в центре сейморазведочных профилей, что дает возможность прямого сравнения получаемых по двум методам оценок уровня сейсмической опасности. Результаты измерений, учитывая однородность площадки по скоростям сейсмических волн, представляются кратко по основным параметрам регистрируемых микросейсм и в обобщенном виде по средней частотной характеристике (см. рис. 4, з). Отмечается, что частоты основных максимумов (f_{\max}) меняются от 2.9 до 4.4, максимальные значения АЧХ ($U(f)_{\max}$) от 6.6 до 12.8, приращения балльности (ΔI) по отношению к эталонным коренным породам (по формуле 2) от 1.6 до 2.2 балла, а сейсмическая опасность в баллах (I) по методу микросейсм от 8.6 до 9.2. От среднего значения различия в сейсмической опасности площадки незначительны и меняются в пределах ± 0.2 балла, что также (как и по методу сейсмических жесткостей) говорит об однородности площадки по сейсмическим свойствам грунтов, определенных по методу микросейсм.

Сравнение АЧХ по записям землетрясений (см. рис. 4, в) и микросейсм (см. рис. 4, з) показывает, что

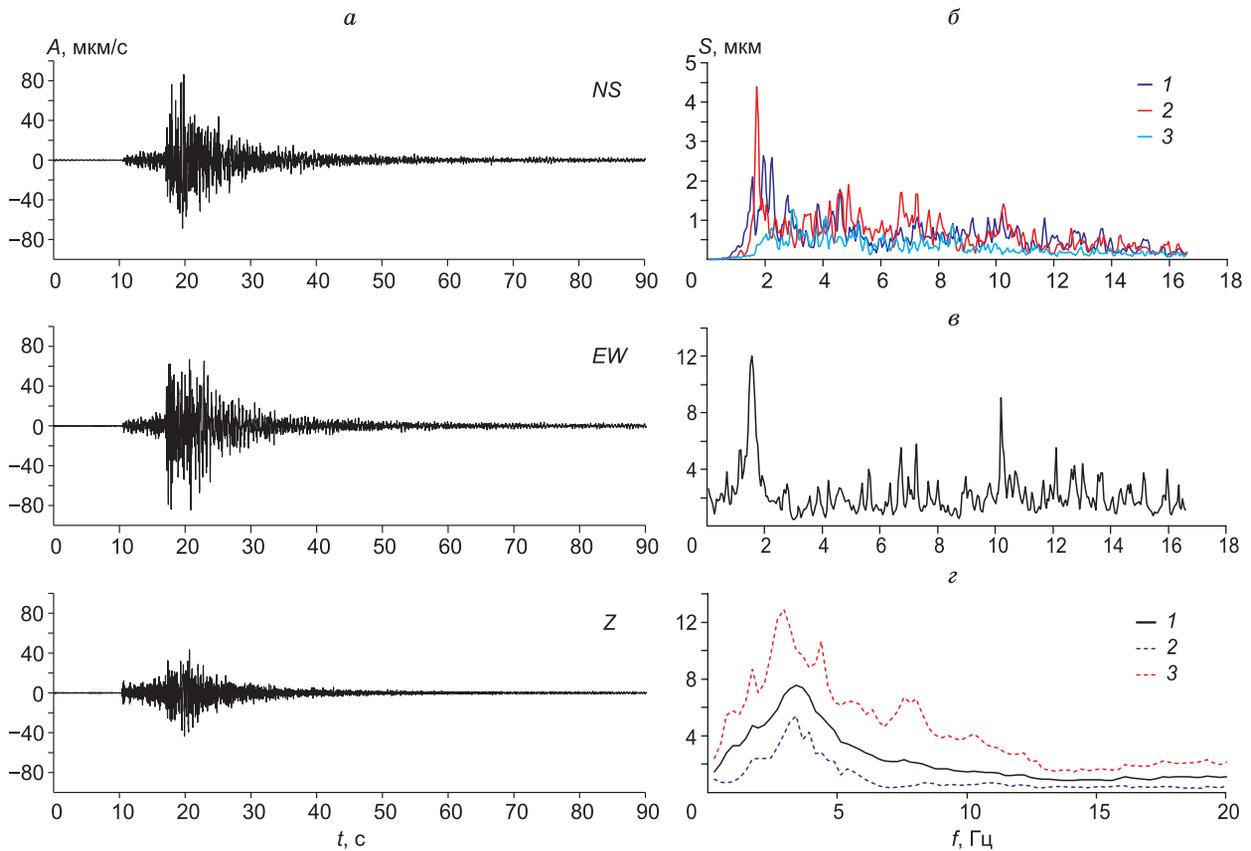


Рис. 4. Основные сейсмические характеристики выбранного землетрясения и зарегистрированных микросейсм для площадки исследований. а – запись скоростей колебаний грунта для направления *NS*, *EW* и *Z*; б – амплитудные спектры Фурье, соответствующие записям землетрясения ($K = 9.5$; $\Delta = 56.5$ км), для компонент *NS*, *EW* и *Z*, представленных на рисунке а: 1 – *NS*, 2 – *EW*, 3 – *Z*; в – несглаженная АЧХ слоя рыхлых отложений в пункте регистрации землетрясений, рассчитанная по методу спектральных отношений; з – средняя АЧХ грунтов в пунктах наблюдения на исследуемой площадке по данным записей микросейсм: 1 – средняя АЧХ, 2 – минимальное значение, 3 – максимальное значение.

Таблица 3. Параметры расчетных сейсмических моделей для обобщенных типовых разрезов

№ модели	h , м	v_p	v_s	ρ , т/м ³	v_p/v_s
		м/с			
1 (модель эталона)	10	2000	1050	2.5	1.90
	10	2400	1290	2.6	1.86
	∞	2800	1540	2.7	1.81
2 (участок исследований)	2	320	150	1.7	2.1
	6	1600	320	1.9	5.00
	23	1800	370	2.0	4.86
	30	1900	480	2.1	3.96
	10	2000	1050	2.5	1.90
	10	2400	1290	2.6	1.86
	∞	2800	1540	2.7	1.81

Примечание. ρ – объемная масса грунтов.

первый максимум на низких частотах уверенно выделяется на обеих кривых в пределах 1–2 Гц, но по записям микросейсм он несколько занижен по уровню. Это имеет существенное значение в направлении использования экспериментальных АЧХ для дальнейших теоретических расчетов, поскольку для оценки сейсмической опасности важны первые максимумы на относительно низких частотах, на которые приходится большая часть энергии колебаний при землетрясениях.

Завершающим этапом количественной оценки параметров движений грунта на случай сильных прогнозируемых землетрясений являются данные расчетных методов. Их получение требует построения расчетных моделей, задания исходного сигнала (с учетом зон ВОЗ) и проведения теоретических расчетов [Джурик и др., 2022]. В нашем случае достаточным было построение для площадки, учитывая ее однородность, двух моделей: модель эталона № 1, соответствующая «коренным» породам для исследуемого района, и модель № 2, согласно данным сейсмозондирований (см. рис. 3) и проведенным ранее исследованиям [Джурик и др., 2013]. Параметры моделей практически обоснованы выше и характеризуются мощностью слоев (h), скоростями распространения продольных и поперечных волн (v_p и v_s) и объемной массой грунтов (ρ). Отмечается, что глубина залегания коренных эталонных грунтов на площадке оценивалась по данным электроразведки (табл. 3).

Исходный сигнал для вероятного сильного землетрясения определяется с учетом параметров сильных землетрясений по методике, изложенной в работах [Ратникова, 1984; Джурик и др., 2015; Джурик и др., 2023], и с использованием местных землетрясений из каталога Байкальского филиала ЕГС РАН [2024]. Само задание сводилось к следующим процедурам. Были выбраны записи относительно сильных трехкомпонентных акселерограмм из интересующих нас зон ВОЗ (см. рис. 1). Таких оказалось всего пять, их основные параметры находятся в следующих пределах: проявления сейсмичности (I) от 3 до 5 баллов, магнитуда (M) 3.7–5.5, энергетический класс (K_p)

10.7–14.5 и эпицентральные расстояния (Δ) 61–170 км. Были использованы записи с сейсмических станций (см. рис. 1), ближайших по эпицентральному расстоянию к рассматриваемым зонам ВОЗ. Для каждого выбранного землетрясения, зарегистрированного на определенной сейсмической станции, для трех компонент были рассчитаны спектры. В качестве примера они представляются для двух землетрясений – Максимихинского и Туркинского (рис. 5). Ускорения зарегистрированных акселерограмм не превышают 10 см/с², а максимумы их спектров на уровне 0.5 лежат в интервале 1–10 Гц. Из выбранных землетрясений находились средние спектры ускорений, которые в свою очередь принимались как характеристика для всей эпицентральной зоны целиком. Отдельно анализировались компоненты NS , EW , Z , и для каждого отобранного землетрясения рассчитывались амплитудные и фазовые спектры.

Особенностью наших расчетов является необходимость создания одного исходного сигнала, но с тем условием, чтобы он учитывал данные спектрального состава колебаний из всех выбранных зон ВОЗ (см. рис. 2). Сама процедура вычислений кратко заключается в следующем. Реализуется разделение амплитудной и фазовой характеристик выбранного землетрясения с помощью прямого преобразования Фурье. Эта процедура необходима для получения амплитудного и фазового спектров. Затем делается нормировка амплитудных спектров по их максимальному значению. Далее отдельно рассчитывается средний спектр для максимальной горизонтальной и вертикальной компонент и путем обратного преобразования Фурье [Марпл, 1990] восстанавливается средняя нормированная акселерограмма. Фазовые характеристики в этом случае для компонент NS , EW и Z рассчитаны по записям Максимихинского землетрясения от 20.05.2008 г.

Тем самым мы получили необходимые данные для формирования исходного сигнала с учетом спектрального состава колебаний грунтов, вызванных местными землетрясениями [Джурик и др., 2015]. Он был нормирован для всех выбранных землетрясений

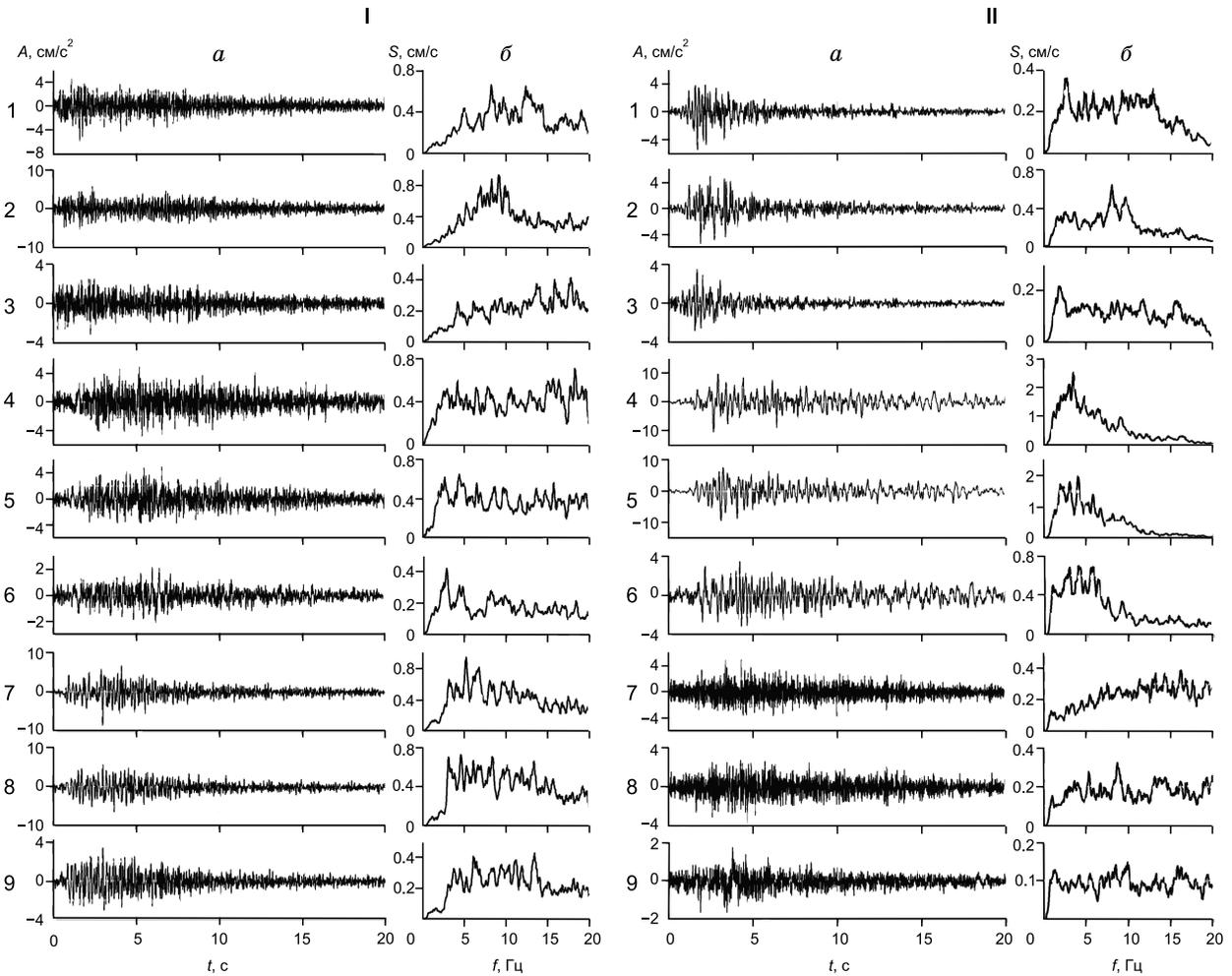


Рис. 5. Примеры спектрального анализа выбранных землетрясений для формирования исходного сигнала. I: *a* – акселерограммы Максимихинского землетрясения (20.05.2008 г.); *б* – соответствующие им амплитудные спектры Фурье. 1–3 – записи, зарегистрированные на сейсмостанции «Онгурены», для *NS*, *EW* и *Z* компонент соответственно. 4–6 – записи, зарегистрированные на сейсмостанции «Суво», для *NS*, *EW* и *Z* компонент соответственно. 7–9 – записи, зарегистрированные на сейсмостанции «Тырган», для *NS*, *EW* и *Z* компонент соответственно. II: *a* – акселерограммы Туркинского землетрясения (16.07.2011 г.); *б* – соответствующие им амплитудные спектры Фурье. 1–3 – записи, зарегистрированные на сейсмостанции «Онгурены», для *NS*, *EW* и *Z* компонент соответственно. 4–6 – записи, зарегистрированные на сейсмостанции «Кабанск», для *NS*, *EW* и *Z* компонент соответственно. 7–9 – записи, зарегистрированные на сейсмостанции «Суво», для *NS*, *EW* и *Z* компонент соответственно.

с учетом максимального значения усредненных ускорений для каждой компоненты. Далее они использовались как исходные сигналы для модели эталона (табл. 3) также для каждой компоненты. Результаты расчетов по методу тонкослоистых сред [Оценка..., 1988] представлены на рис. 6. Вначале для модели эталона № 1 (коренные породы, см. табл. 3) их окончательные результаты (максимальные ускорения) масштабировались на уровень принятой исходной сейсмичности, равной 8 баллам для грунтов I категории. Это допускается нормативными документами при отсутствии достаточного статистического набора записей сильных землетрясений [Строительство..., 2018].

Основные параметры сформированных акселерограмм (см. рис. 6, I) следующие: продолжительность

колебаний около 20 с, интервал частот спектра на уровне 0.5 от максимума для горизонтальных компонент (*NS* и *EW*) меняется от 1.9 до 16.1 Гц, а на уровне 0.7 от максимума – от 2.49 до 11.8. Максимальные значения основных максимумов спектра приходятся на частоты 6.74 и 6.79 Гц, а их значения достигают 18.2 и 20.4 см/с. Максимальное значение ускорений находится в интервале 98–100 см/с².

Для вертикальной компоненты отмеченные выше величины распределяются следующим образом: интервал частот спектра на уровне 0.5 от максимума меняется от 1.9 до 15.4 Гц, на уровне 0.7 от максимума – от 3.03 до 10.4 Гц. Значение основного максимума спектра приходится на частоту 4.44 Гц и равно 10.5 см/с. Максимальное значение ускорений состав-

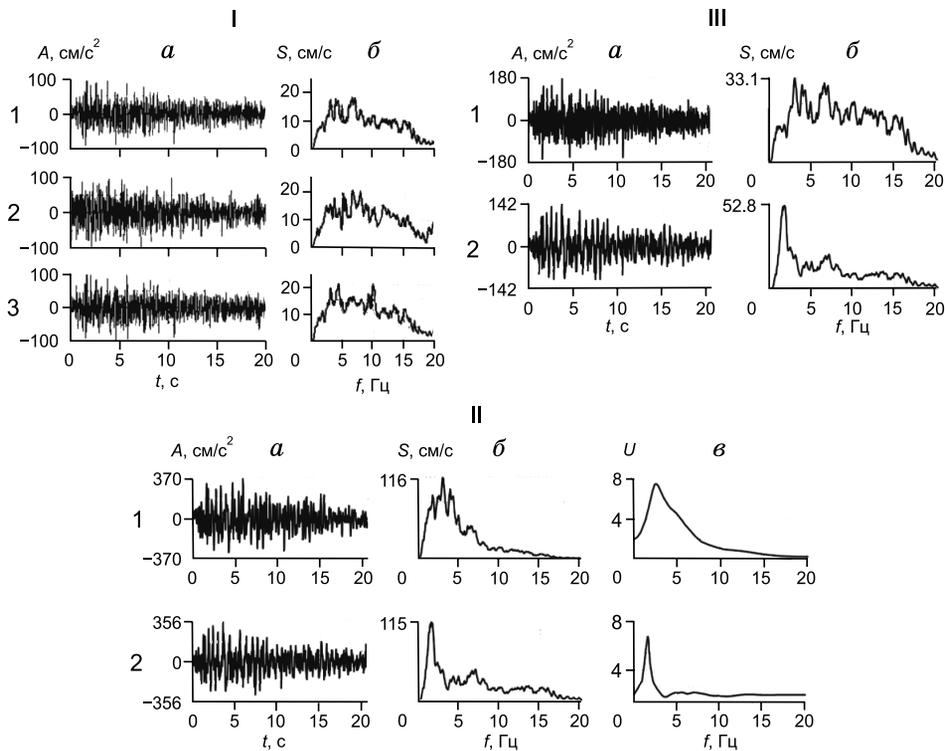


Рис. 6. Количественная оценка параметров движений грунта на случай сильных землетрясений по данным расчетных методов. I – сформированный сейсмический сигнал для коренных «эталонных» грунтов для территории исследований с принятой исходной сейсмичностью, равной 8 баллам: *а* – исходные акселерограммы, *б* – соответствующие им амплитудные спектры Фурье: 1 – для *NS*, 2 – для *EW*, 3 – для *Z* компоненты (фазовые характеристики рассчитаны по записи Максимихинского землетрясения от 20.05.2008 г.). II – результаты расчетов для максимальной горизонтальной компоненты акселерограмм (*а*), их спектров (*б*) и АЧХ (*в*): 1 – по методу тонкослоистых сред; 2 – при использовании частотной характеристики по записям землетрясения. III – результаты расчетов для вертикальной компоненты акселерограмм (*а*) и их спектров (*б*): 1 – по методу тонкослоистых сред; 2 – при использовании частотной характеристики по записям землетрясений.

ляет 49 см/с^2 . Параметры синтезированной акселерограммы (по частотному составу) отвечают как близким, так и относительно далеким сильным землетрясениям, т. е. по частотному составу, по возможности, учтены основные особенности зон ВОЗ для площадки. По максимальным ускорениям они соответствуют 7-балльному сейсмическому воздействию для эталонных коренных пород [ОСР-2015, 2015].

Результаты расчетов при использовании сформированных исходных сигналов и построенных моделей (см. рис. 6, I; табл. 3) представляются по двум подходам: по методу тонкослоистых сред [Ратникова, 1984] (см. рис. 6, II–III (1)) и при использовании экспериментальных частотных характеристик (см. рис. 6, II–III (2)).

В первом случае при использовании сформированного исходного сигнала (см. рис. 6, I), падающего на основание построенной сейсмогрунтовой модели участка исследований (см. табл. 3, модель № 2), получены следующие расчетные данные. Ускорение колебаний достигает значений, равных 370 см/с^2 для максимальной горизонтальной компоненты *NS* и 180 см/с^2 для *Z* компоненты. Максимальное значение

спектров: 116 см/с – *NS* и 33.1 см/с – *Z*. Максимумы спектров на уровне 0.7 лежат в интервале $1.81\text{--}4.44 \text{ Гц}$ – *NS* и $2.88\text{--}10.3 \text{ Гц}$ – *Z* (см. рис. 6, II–III (1)). Максимальное значение частотной характеристики эталона, найденное по отношению спектров горизонтальной (см. рис. 6, I (2б)) и вертикальной (см. рис. 6, I (3б)) компонент, в интервале частот от $0.5\text{--}1.0$ до $15\text{--}20 \text{ Гц}$ мало зависит от частоты и меняется в рассматриваемом интервале от 1.8 до 2.2. Эти значения в дальнейшем могут использоваться для оценки сейсмической опасности грунтов по отношению к эталону для исследуемой площадки по данным записей землетрясений по формуле (2).

Для второго подхода реализуется «прямой» способ расчетов максимальных ускорений, который основывается на использовании экспериментальных частотных характеристик, полученных по данным записей землетрясений. Техника расчета, как было отмечено ранее, заключалась в умножении спектра «эталона» (см. рис. 6, I (б)) для выбранных компонент *NS* и *Z* на частотную характеристику, полученную по данным записи землетрясения (см. рис. 4, а). Сама частотная характеристика находилась, как и для за-

писей микросейсм, путем деления спектра максимальной горизонтальной компоненты зарегистрированного землетрясения на спектр вертикальной компоненты, а не векторной суммы двух компонент, как это было выполнено ранее (см. рис. 4, в). В этом случае максимальное значение частотной характеристики равно 8,1 на частоте 1,7 (см. рис. 6, II (2в)) и близко к первому максимуму средней частотной характеристики по данным микросейсм (см. рис. 4, з).

Далее путем обратного преобразования Фурье проводилось восстановление сигнала (акселерограмм) на поверхности грунта (см. рис. 6, II–III (2)). При такой реализации расчетов возможно ожидать проявления сейсмических воздействий на территории исследований по пиковым ускорениям [Транспортные сооружения..., 2017], равным $356 \text{ см/с}^2 - NS$ и $142 \text{ см/с}^2 - Z$. Максимальное значение спектров: $115 \text{ см/с} - NS$ и $52.8 \text{ см/с} - Z$. Максимумы спектров на уровне 0.7 лежат в интервале 1.32–2.10 Гц – NS и Z .

Не менее важной характеристикой сейсмических воздействий является изменение интенсивности сейсмических колебаний слоем рыхлых грунтов в зависимости от частоты. Наглядно это показывают ча-

стотные характеристики, полученные по реализованным двум подходам, представленные на рис. 6, II (6). Их расчетные максимальные значения лежат в интервале 1.7–2.8 Гц и хорошо согласуются с первыми двумя максимумами средней и максимальной частотных характеристик по данным микросейсм (см. рис. 4, з). На указанных частотах можно ожидать наибольших увеличений интенсивности колебаний при сильных землетрясениях для водонасыщенного слоя рыхлых грунтов. В то же время различие на один герц на низких частотах является существенным для сравнимых максимальных значений частотных характеристик. Это требует дальнейшего накопления данных по записям колебаний приповерхностных грунтовых слоев при сильных землетрясениях, поскольку их различие по составу и состоянию могут вносить существенные изменения в величину пиковых ускорений [Дещеревская и др., 2024].

Как было отмечено ранее, представленные сведения по значениям максимальных частотных характеристик («эталоны» от 1.8 до 2.4 и экспериментальной АЧХ, полученной по данным записей землетрясения, близкой к 8.1) позволяют по амплитудно-частотному

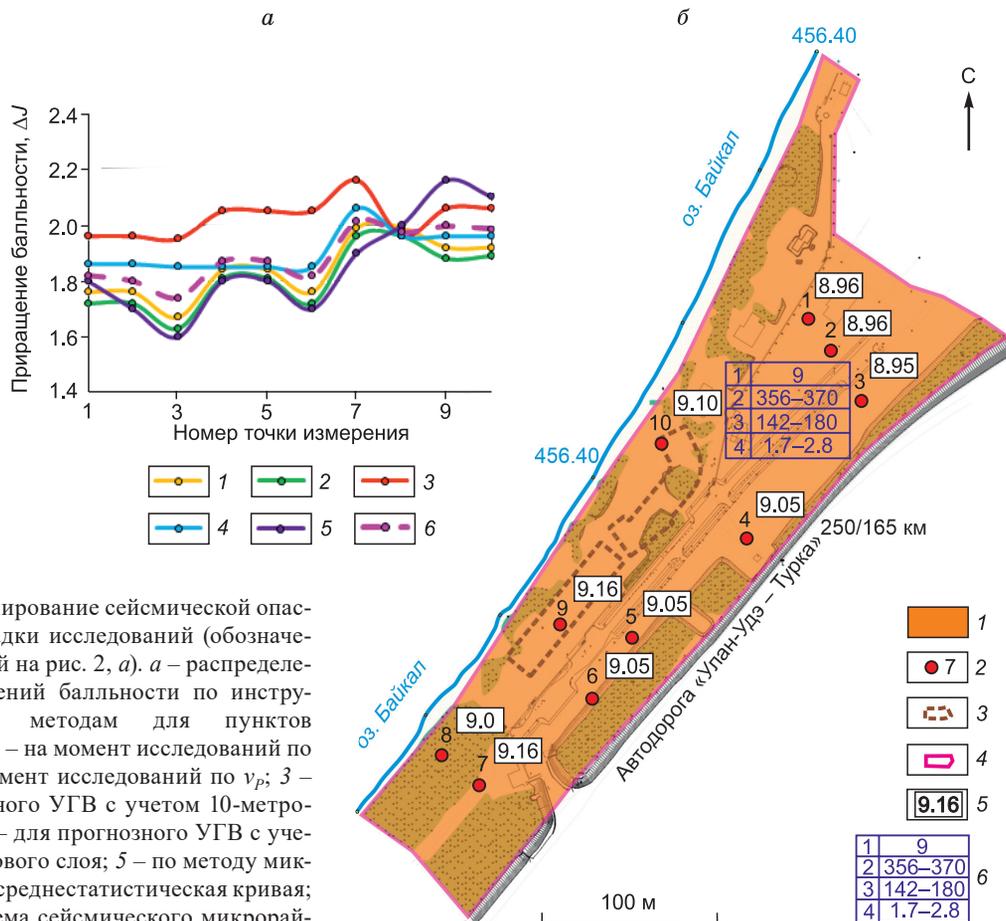


Рис. 7. Районирование сейсмической опасности площадки исследований (обозначена звездочкой на рис. 2, а). а – распределение приращений балльности по инструментальным методам для пунктов измерений: 1 – на момент исследований по v_s ; 2 – на момент исследований по v_p ; 3 – для прогнозного УГВ с учетом 10-метрового слоя; 4 – для прогнозного УГВ с учетом 30-метрового слоя; 5 – по методу микросейсм; б – среднестатистическая кривая; б – карта-схема сейсмического микрорайонирования: 1 – сейсмичность 9 баллов;

2 – точка геофизического наблюдения и ее номер; 3 – граница проектируемых сооружений; 4 – граница участка работ; 5 – сейсмичность в точке измерения в баллах; б: 1 – принятая сейсмическая опасность (балл), 2 – максимальное ускорение для горизонтальной компоненты (см/с), 3 – максимальное ускорение для вертикальной компоненты (см/с), 4 – резонансная частота рыхлых отложений (Гц).

методу оценить по формуле (2) приращение сейсмической опасности площадки. Среднее ее значение принимается равным 1.96 балла.

Таким образом, нами получены все необходимые сведения по данным инструментальных (метод сейсмических жесткостей, микросейсм, регистрация землетрясений) и расчетных методов по оценке основных сейсмических воздействий прогнозируемых сильных землетрясений для конкретной территории побережья оз. Байкал. Это дает нам возможность представить объективную комплексную оценку сейсмической опасности исследуемой территории в виде карты СМР (рис. 7).

Для окончательного выбора сейсмической опасности в каждом пункте выполненных измерений представлен график ее распределения в баллах по всем использованным методам (см. рис. 7, а). Он показывает, что сходимость расчетных данных хорошая и находится в пределах среднеквадратической погрешности каждого из использованных методов (± 0.2 балла).

Направленность изменений ΔI по всем методам сохраняется, а различия между ними в большей степени носят систематический характер или связаны с учетом прогнозируемой отметки УГВ, что и приводит к получению относительно повышенных значений приращений балльности. Это позволяет нам выполнить районирование участка по значениям максимальных приращений балльности (сейсмической опасности), рассчитанных для каждого пункта измерений. В этом случае его сейсмическая опасность по инструментальным данным будет меняться от 8.95 до 9.2 балла, принимается как однородная и оценивается в 9 баллов (см. рис. 7, б).

Максимальное ускорение сейсмических колебаний на случай прогнозируемых сильных землетрясений для компоненты NS оценивается в 356–370 см/с², для компоненты Z в 142–180 см/с². Преобладающие периоды сильных землетрясений по максимальным значениям спектров меняются от 0.3 до 1 с, наиболее вероятная резонансная частота для территории близка к значениям 1.7–2.8 Гц. Для исследуемого участка рекомендуется использовать максимальные значения указанных ускорений для каждой компоненты. Представленные сведения могут быть полезными для решения теоретических и практических задач при расчетах сейсмических воздействий прогнозируемых сильных землетрясений для бережных территорий оз. Байкал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Основная цель исследований связана с прогнозом сейсмических воздействий сильных землетрясений на различных уровнях районирования сейсмической опасности для юго-восточной части побережья Центрального Байкала. Учитывая дискуссионное современное состояние решения поставленных задач гео-

физическими, сейсмогеологическими и инженерно-сейсмологическими методами, для их возможной реализации нами использован практически полный набор рекомендуемых нормативными документами методов районирования сейсмической опасности. За основу достоверности выбранных подходов и методов в отношении уточнения исходной сейсмичности приняты проявления на исследуемой территории зарегистрированных ранее относительно сильных землетрясений, а также в отношении СМР, вполне обоснованно приняты зарегистрированные сведения о поведении бережных водонасыщенных массивов рыхлых отложений по данным записей местных близких землетрясений.

В результате в направлении УИС проведен анализ материалов сейсмологических и детальных сеймотектонических исследований, который позволил построить карту-схему уточненной сейсмической опасности района исследований. Для этого были установлены зоны ВОЗ с прогнозными M_{max} и дальнейшим переходом к районированию сотрясений с различной балльностью. Принятая на этой основе величина исходной сейсмичности (8 баллов, карта «А», $T = 500$ лет) является вполне обоснованной для юго-восточной части побережья Центрального Байкала, она подтверждается сведениями графика сейсмического режима и не противоречит установленным правилам по уточнению исходной сейсмичности согласно нормативным документам. Однако полученные данные свидетельствуют о необходимости составления карт УИС для районов Среднего Байкала в более крупном масштабе по отношению к существующим картам общего сейсмического районирования.

В направлении СМР использованный комплекс геофизических методов позволил оценить сейсмическую опасность площадки исследований, которая характеризуется худшими грунтовыми условиями для строительства на бережных территориях Среднего Байкала в баллах и в максимальных ускорениях. В целом для конкретной территории использованные и рекомендованные методы и подходы дают сравнимые результаты по оценке сейсмической опасности в баллах. Сами различия имеют систематический характер и объясняются степенью использования при расчетах тех или иных исходных параметров, что подтверждает возможность их применения для решения задач как УИС, так и для СМР. На данном этапе не исключается регистрация поведения поверхности грунтовых массивов при местных землетрясениях.

В направлении дальнейшего развития и совершенствования использованных методов районирования сейсмической опасности представлены все основные исходные инструментальные и расчетные данные, которые в их сравнении могут в дальнейшем использоваться при реализации новых подходов к оценке требуемых параметров сейсмических воздействий, необходимых для проектирования сейсмостойкого

строительства в пределах побережья оз. Байкал, с повышенной сейсмической опасностью по отношению к прилегающим территориям.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

В работе задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682. Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

ЛИТЕРАТУРА

- Алешин А.С. (2017). Фундаментальные аспекты сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, № 4, с. 8–17.
- Байкальский филиал Единой геофизической службы РАН. (2024). [Электронный ресурс]. URL: <https://seis-bykl.ru/> (дата обращения 17.12.2024).
- Бунэ В.И., Катрих И.Р. (1980). Оценка вероятности землетрясений при составлении карты сейсмического районирования (Крым, Молдавия) // Количественная оценка сейсмических воздействий (вопросы инженерной сейсмологии) / Ред. С.В. Медведев. М., Наука, с. 3–14.
- Голенецкий С.И. (1997). Землетрясения в Иркутске. Иркутск, Имя, 94 с.
- Гриб Н.Н., Колодезников И.И., Гриб Г.В. (2024). Уточнение исходной сейсмичности района строительства горно-обогатительного комбината «Токкинское» // Международный научно-исследовательский журнал, № 1 (139), с. 1–8, DOI: [10.23670/IRJ.2024.139.27](https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.27).
- Дещеревская Е.В., Павленко О.В. (2024). Проверка нормативных формул оценки уровня ускорений в СП 286.1325800.2016 «Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования» на реальных данных // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, № 1, с. 22–30, DOI: [10.37153/2618-9283-2024-1-22-30](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2024-1-22-30).
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Усынин Л.А., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю., Шагун А.Н. (2013). Пример комплексной оценки сейсмической опасности участка строительства аэропорта «Горячинск» // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о земле, т. 6 (1), с. 28–45.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю. (2015). Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов // Вулканология и сейсмология, № 5, с. 57–67, DOI: [10.7868/S020303061505003X](https://doi.org/10.7868/S020303061505003X).
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю. (2022). Оценка сейсмических воздействий сильных землетрясений в различных мерзлотных и сейсмических зонах Монголо-Сибирского региона // Геодинамика и тектонофизика, т. 13 (2s), с. 1–7, DOI: [10.5800/GT-2022-13-2s-0623](https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0623).
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Батсайхан Ц., Серебренников С.П. (2023). Сейсмокриодинамика и прогноз сейсмических воздействий сильных землетрясений Байкало-Монгольского региона при деградации мерзлоты // Геология и геофизика, т. 64, № 3, с. 447–457, DOI: [10.15372/GiG2022121](https://doi.org/10.15372/GiG2022121), EDN: YLEJNT.
- Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А., Черных Е.Н., Еманов А.А., Семин А.Ю., Черепанов А.В. (2008). Резонансные свойства верхней части разреза // Физическая мезомеханика, т. 11 (1), с. 26–36.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П., Козьмин Б.М., Гриб Н.Н., Чипизубов А.В. (2015). Карта сейсмоструктуры Восточной Сибири // Геодинамика и тектонофизика, т. 6 (3), с. 257–287, DOI: [10.5800/GT-2015-6-3-0182](https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0182).
- Марпл С.Л. (1990). Цифровой спектральный анализ и его приложения. М., Мир, 584 с.
- Медведев С.В. (1962). Инженерная сейсмология. М., Госстройиздат, 260 с.
- Методические рекомендации по сейсмическому микрорайонированию участков строительства транспортных сооружений. МДС 22-1.2004. (2004). М., ФГУП ЦПП, 48 с.
- Огильви А.А. (1990). Основы инженерной геофизики. М., Недра, 501 с.
- ОСР-2015. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Изменение № 1 к СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах». (2015). М., Стандартинформ, 27 с.
- Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. (1988). Ред. О.В. Павлов. М., Наука, 224 с.
- Ратникова Л.И. (1984). Расчет колебаний на свободной поверхности во внутренних точках горизонтально-слоистого поглощающего грунта // Сейсмическое микрорайонирование / Под ред. О.В. Павлова, В.А. Рогожиной. М., Наука, с. 116–132.
- Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. (1980). Ред. В.И. Бунэ. М., Наука, 307 с.
- Сейсморазведка. Справочник геофизика. (1981). Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. М., Недра, 462 с.
- СКЗ ОСР-2012. Специализированный каталог землетрясений Северной Евразии для общего сейсмического районирования территории Российской Федерации. (2012). Ред. В.И. Уломов [Электронный ресурс]. URL: <http://seismos-u.ifz.ru/documents/Eartquake-Catalog-CK3.pdf>.
- Строительство в сейсмических районах: СП 14.13330.2018. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. (2018). М., Стандартинформ, 117 с.
- Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического микрорайонирования: СП 269.1325800.2016. (2017). М., Стандартинформ, 42 с.
- Чипизубов А.В. (2016). Проблемные исторические землетрясения Прибайкалья // Вопросы инженерной сейсмологии, т. 43 (2), с. 53–72.
- Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М., Имаев В.С. (2009). Палеосейсмичность Прибайкалья // Вопросы инженерной сейсмологии, т. 36 (1), с. 7–22.
- Электроразведка. Справочник геофизика. (1980). Под ред. А.Г. Тархова, В.В. Федынского. М., Недра, 518 с.
- Ibs-von Seht M., Wohlenberg J. (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments // Bull. Seismol. Soc. Am., v. 89 (1), p. 250–259, DOI: [10.1785/BSSA0890010250](https://doi.org/10.1785/BSSA0890010250).
- Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Q. Rep. RTRI, v. 30 (1), p. 25–33.