

УДК 550.343/344

СЕЙСМОКРИОДИНАМИКА И ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКОГО РЕГИОНА ПРИ ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ

В.И. Джурик¹, Е.В. Брыжак¹, Ц. Батсайхан², С.П. Серебренников¹

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

²Институт астрономии и геофизики МАН, Улаанбаатар, 15 микрорайон, Монголия

Выполненные исследования направлены на решение фундаментальной проблемы современной геодинамики и сейсмичности литосферы Центральной Азии. Цель работ связана с прогнозом сейсмических воздействий сильных землетрясений и обеспечением сейсмической безопасности территории Байкало-Монгольского региона. Конкретной задачей является прогноз проявления сейсмичности в пределах особых инженерно-сейсмогеокриологических областей, на которых вечная мерзлота существенно усложняет оценку и районирование максимальных сейсмических воздействий. В итоге обобщены ранее проведенные исследования и представлены новые данные для конкретных территорий с учетом изучения основных закономерностей сейсмокриодинамики: от анализа изосейст сильных землетрясений, связанных, в свою очередь, с проявлениями сейсмичности Байкало-Монгольского региона, до реализации прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений при деградации мерзлоты на примере конкретных участков, расположенных в различных сейсмоклиматических зонах. Представленные карты-схемы реализации прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений при деградации мерзлоты могут являться основой изучения пространственно-временной неоднородности поведения криолитозоны при температурных, техногенных и сейсмических нагрузках.

Сейсмокриодинамика, криолитозона, сейсмические воздействия, сейсмограммы, спектры, частотные характеристики, Бурэнханский ГОК, Мульская впадина, Байкало-Монгольский регион

PREDICTING DYNAMIC EFFECTS OF LARGE EARTHQUAKES IN AREAS OF DEGRADING PERMAFROST (Baikal–mongolia region)

V.I. Dzhurik, E.V. Bryzhak, Ts. Batsayhan, S.P. Serebrennikov

The study addresses basic problems of modern geodynamics and seismicity of the Central Asian lithosphere. It aims at predicting dynamic effects of large earthquakes for seismic safety of the Baikal–Mongolian region. Special focus is made on the seismic behavior of areas where seismic risk zoning is problematic because of permafrost. The paper presents synthesis of previous and new data on ground responses to large earthquakes in specific territories of the Baikal–Mongolia region with complex cryological conditions. The results include shaking intensity patterns and predicted seismic parameter values for degraded permafrost in zones of different climates and seismicity levels. The obtained prediction maps can make reference in studies of variable permafrost responses to temperature, seismic, and mining-related impacts.

Seismicity, permafrost, dynamic effect, seismogram, frequency response, Burenhan mining and processing works, Myya basin, Baikal–Mongolia region

ВВЕДЕНИЕ

В нашем понимании сейсмокриодинамика рассматривает закономерности проявления сейсмичности в пределах криолитозоны как результат изменения характера сейсмических колебаний при сильных землетрясениях слоев мерзлых грунтов, из-за изменения их температуры под воздействием климата и техногенеза на различных масштабных уровнях: от локальных площадок отдельных ответственных сооружений до региональных, с учетом сейсмоклиматических зон [Джурик и др., 2021a].

Байкало-Монгольский регион, в состав которой входят Иркутская и Читинская области, Республика Бурятия и пять аймаков Монголии, включающих Хубсугул и бассейн Селенги, представляет собой территорию с высоким уровнем сейсмической активности и широким распространением многолетне-мерзлых грунтов. Эти факторы во многом определяют экономическое развитие региона. Неслучайно изучение сейсмичности, особенностей проявления землетрясений, закономерностей современных гео-

динамических процессов и оценка сейсмической опасности в регионе являются актуальными [Джурик и др., 2009].

В прошедшем столетии этот регион являлся ареной крупнейших в мире внутриконтинентальных землетрясений (до 10—11 баллов), связанных с высоким сейсмическим потенциалом [Землетрясения..., 1985]. В целом они определяются следующими основными показателями.

В Монголии наличие вечной мерзлоты обусловлено высокой климатической зональностью, пространственным размещением горных хребтов и крутизной их склонов. Согласно данным геокриологических исследований, многолетнемерзлые породы (ММП) в большей степени распространены на севере и северо-западе Монголии. Примерно 30 % ее территории приходится на зоны сплошного, прерывистого и массивно-островного распространения ММП [Геокриологическая карта..., 1981]. Самые низкие температуры мерзлых грунтов характерны для высокогорных районов (-10 до -3 °C). В верховьях ручьев, речных долинах, тектонических впадинах мощность мерзлоты достигает 140 м, температура около -1 °C, а глубина сезонного промерзания достигает 4.5 м [Васильев и др., 1987].

Байкальский регион также отличается значительными вариациями как потенциальной сейсмической опасности, так и температурного поля грунтов — от положительных температур на юге и юго-западе до -6 °C на северо-востоке, где мощность мерзлоты в долинах превышает 100 м и более, а в высокогорных районах более 400 м [Джурик и др., 2003]. Представляет интерес обобщение выявленных ранее закономерностей проявления сейсмичности в пределах криолитозоны, дополненных проведением необходимых расчетов на современном уровне для конкретных территорий, расположенных в различных сейсмоклиматических зонах Байкало-Монгольского региона [Джурик и др., 2019].

В отношении мерзлотного фактора в последнее время отмечается, что восточный фланг БСЗ (Байкальской сейсмической зоны), согласно прогнозной карте деградации мерзлоты, приведенной в работе [Оганесян, 2019], полностью входит в зону значительной деградации мерзлых толщ, как и прилегающие к этой территории отмеченные выше районы Северной Монголии [Геокриологическая карта..., 1981]. В таких районах вероятны температурные изменения слоев мерзлоты под воздействием техногенных и естественных факторов, что, в свою очередь, обосновывает необходимость прогноза их поведения при сильных землетрясениях [Gupta и др., 2018; Джурик и др., 2000].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Сейсмические воздействия (амплитуды, длительность, спектральный состав и другие параметры акселерограмм и их спектров) характеризуют колебательное движение грунта при землетрясениях и определяют степень изменения их неупругих деформаций при деградации мерзлоты. Они являются основой при количественном районировании сейсмической опасности территорий с различной степенью детальности в параметрах вероятных сейсмических воздействий. Для их получения использовались данные регистрации землетрясений малых энергий, микросейсм и измерений скоростей распространения упругих волн в слоях, а также оценка состояния мерзлоты в переходных исследуемых климатических зонах [Методическое руководство..., 1988; Briggs и др., 2017].

В методическом отношении для реализации поставленных задач необходимо задание исходных сигналов, соответствующих прогнозной сейсмичности территорий с учетом зон ВОЗ, построение расчетных сейсмогрунтовых моделей, характеризующих естественное и прогнозируемое состояние мерзлоты и проведение теоретических расчетов.

Перечисленные задачи нами решаются традиционным путем. В основном применялись подходы, разработанные другими авторами ранее и нами в процессе изучения основных закономерностей сейсмокриодинамики [Джурик и др., 2021б]. В алгоритмическом отношении особой новизны нет, но при их использовании даются ссылки на конкретные работы.

В направлении задания исходных сигналов использовались два подхода. Первый — это присвоение определенному грунту изучаемого региона (Монголии и Сибири) отдельного или синтезированного, по возможности, среднего спектра нескольких сильных землетрясений, зарегистрированных на однотипных грунтах, включая и записи местных слабых землетрясений, но из одних и тех же зон ВОЗ. Второй путь заключается в экстраполяции спектров слабых и умеренной силы колебаний исследуемого грунта в сторону более высоких энергетических классов с учетом эпицентральных расстояний. Этот путь может быть реализован как для конкретных очаговых зон (в которых возможно возникновение сильного землетрясения), так и для всего эпицентрального поля землетрясений [Джурик и др., 2015]. Применение отмеченных подходов к конкретным территориям определялось количеством имеющихся данных по записям относительно сильных землетрясений из опасных для них зон ВОЗ. Но в любом случае необходимо приведение сформированного исходного сигнала в пункте регистрации землетрясений к «этalonу» для изучаемых территорий, представленному сейсмогрунтовой моделью. Сам переход осуществляется через расчет частотных характеристик верхних грунтовых слоев, лежащих на коренных породах, соответствующих сформированной модели эталона [Джурик и др., 2020].

В направлении построения расчетных сейсмогрунтовых моделей для естественного и прогнозируемого состояния мерзлоты не исключалось использование измерений скоростей сейсмических волн, выполненных нами ранее в натурных и лабораторных условиях, включая и метод прогноза упругих параметров мерзлых грунтов при их оттаивании [Геология..., 1985; Сейсмотектоника..., 1993]. Необходимые данные по сейсмичности и комплексу методов геофизики, связанные с уточнением строения верхней части разреза до относительно сохранных «эталонных» коренных пород для конкретно районированных по сейсмической опасности площадок, приводятся при анализе полученных результатов.

В направлении расчетов акселерограмм сильных землетрясений они проводились с помощью разработанной методики и программы расчетов колебаний на поверхности и во внутренних точках среды [Методическое руководство..., 1988]. При расчетах динамических параметров мерзлого и водонасыщенного состояния грунтов применялись полученные нами амплитудно-частотные характеристики $U(f)$. Далее рассчитывался спектр «эталонного» сигнала $S_{\text{эт}}(f)$, соответствующего установленной исходной сейсмичности, и проводился расчет спектра колебаний прогнозируемого сильного землетрясения $S(f)$ на поверхности исследуемой толщи грунта, представленной сейсмогрунтовой моделью, согласно выражению:

$$S(f) = S_{\text{эт}}(f)U(f). \quad (1)$$

Частотные характеристики рассчитывались двумя способами. Первый способ спектральных отношений (H/V) основан на записях микросейсм или землетрясений на одной сейсмической станции [Nakamura, 1989]. Второй, расчетный, на методе тонкослоистых сред, для реализации которого необходимо построение сейсмогрунтовых моделей верхней зоны разреза до «эталонных» коренных пород [Методическое руководство..., 1988].

Для реализации первого способа использовались записи землетрясений, зарегистрированных постоянными сейсмическими станциями Байкальского филиала Единой геофизической службы РАН (БФ ЕГС РАН). Для расчета спектров брали записи акселерограмм общей длительностью 20 с, но сама длительность как исходных, так и расчетных сейсмических характеристик оценивалась на уровне 0.5 или 0.7 от их максимума [Дженкинс, Батте, 1971; Джурик и др., 2020].

В качестве основных показателей, характеризующих влияние мерзлотных условий на спектральный состав зарегистрированных землетрясений для различных зон ВОЗ, применяли сейсмограммы и их спектры, частотные характеристики верхних грунтовых слоев и их параметры. Предлагаемая нами впервые в таком комплексе методика приводит к возможности изучения основных закономерностей сейсмодинамики Байкало-Монгольского региона, но она использовалась для выбранных территорий с различной степенью детальности, которая зависела от имеющихся экспериментальных данных. Более конкретно выбранная методика с некоторыми дополнениями анализируется при обсуждении результатов выполненных работ, связанных с прогнозом изменения сейсмической опасности при деградации мерзлоты.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Проведенный ранее анализ распределения уровня сейсмичности и распространения мерзлоты на территории Восточной Сибири и Монголии показывает, что границы этих зон практически не согласуются [Джурик и др., 2000]. Однако проявление сейсмичности для сильных землетрясений коррелируется с различной степенью затухания балльности с расстоянием для зон сплошной и островной мерзлоты. Это наглядно подтверждается при анализе распределения изосейст зарегистрированных сильных землетрясений региона: Южно-Якутского, Тас-Юряхского и Могодского [Джурик и др., 2009] (рис. 1). Для первых двух землетрясений преобладающее направление основных разломов и геологических структур с запада на восток, к которому должны тяготеть и максимальные проявления интенсивности сотрясений. В какой-то степени это проявляется, но в итоге суммарный уровень сотрясений отвечает распределению по площади основных мерзлотных факторов [Солоненко, 1977].

Если брать северное и южное направления, то затухание балльности для первых двух землетрясений различается в 1.5—2.0 раза. Северное направление (сплошная мерзлота) — среднее спадание балльности от 6 до 5 и 4 отмечается на расстояниях от эпицентра 80, 150 и 240 км, во втором (южное направление) — 10, 310 и 580 км соответственно.

Для Могодского землетрясения, произошедшего в зоне островного распространения мерзлых грунтов, отмеченной закономерности не наблюдается (см. рис. 1). Направление максимальных осей изосейст для этого землетрясения обусловлено активностью структур того же направления, плотностью распределения по ним островов мерзлоты и преобладанием ее в высокогорных районах в южном направлении.

Отмеченные проявления сейсмичности, связанные с мерзлотными особенностями регионов по изосейстам сильных землетрясений, вызывают необходимость разработки методов прогноза сейсмиче-

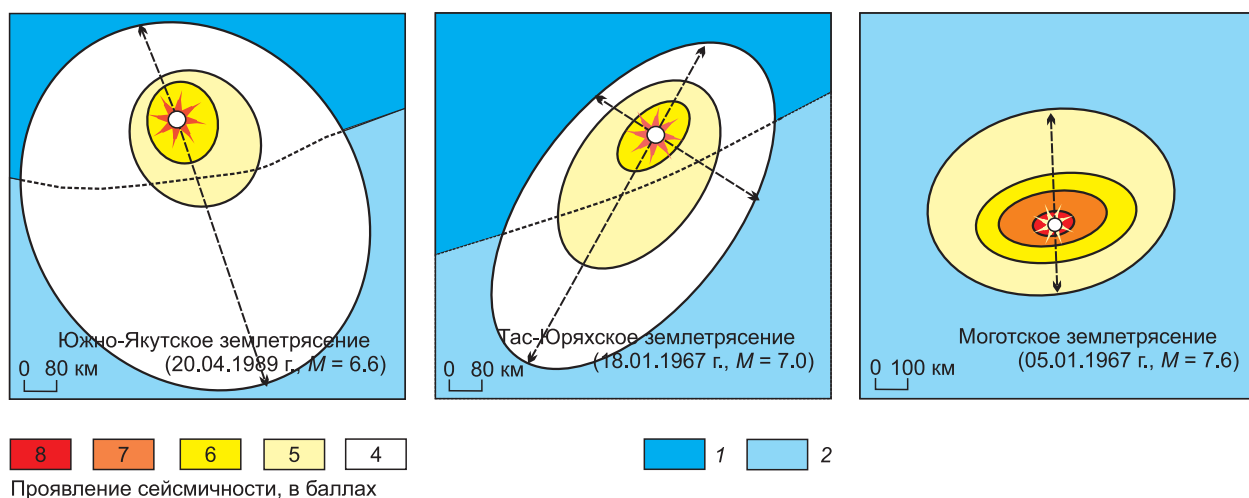


Рис. 1. Проявление сейсмичности сильных землетрясений в различных сейсмоклиматических зонах.

Стрелками указаны преобладающие направления затухания сейсмичности. 1 — зона сплошной мерзлоты, 2 — зона островной мерзлоты.

ских воздействий для естественного состояния мерзлых грунтов и на случай их оттаивания по основным показателям сейсмических воздействий: акселерограммам, спектрам, частотным характеристикам и их параметрам [Джурик и др., 2019]. Такая возможность реализуется на случай полной деградации мерзлоты для территорий, расположенных в различных мерзлотных и сейсмических зонах. Для Байкальской зоны это Муйская впадина, для Монголии — участок строительства Бурэнханского ГОКА.

Муйская впадина вытянута с запада на восток на 130 км (рис. 2, е), ширина ее достигает 40—45 км. Мощность рыхлых отложений в пределах впадины не превышает 1 км [Зорин, 1971]. Основная часть долины охвачена сплошной мерзлотой мощностью более 100 м с температурой от -1.5 до -5.0 °C. Талики с глубоким сезонным промерзанием располагаются в центральной части впадины, районы с мощностью мерзлой толщи до 100 м и температурой от 0 до -1.5 °C занимают практически все внутривпадинные пространства (поймы, надпойменные террасы, наклонные равнины). В обрамляющих впадины горных сооружениях мощность мерзлой толщи может достигать 500 м и более с температурой до -6 °C и ниже [Джурик и др., 2003]. Сейсмичность впадины, согласно общему сейсмическому районированию (ОСР-2015), оценивается в 9 баллов, и она расположена в зоне «значительной деградации мерзлоты» [Оганесян, 2019].

Участок с вероятностью землетрясений 8—9 баллов (рис. 3, е) расположен в пределах Хубсугульского фосфоритоносного бассейна (Северная Монголия), примыкающего к оз. Хубсугул в районе пос. Бурэнхан (в 18 км к западу от горы Мурэн). Занимает относительно ровную межгорную впадину площадью около 16 км². Мощность мерзлых грунтов достигает 20—30 м, но чаще она не выходит за пределы 10—20 м. Общая мощность рыхлых и разрушенных коренных пород не превышает 30 м, температура мерзлого грунта находится в пределах -0.1 ... -2.0 °C, криогенная структура грунтов массивная, слоистая, сетчатая. Исходная сейсмичность территории 8 баллов. Ранее было показано, что в Прихубсугулье землетрясения с $M = 6.5$ вероятны с периодом в 75 лет [Сейсмотектоника..., 1993].

Основой расчетов для количественной оценки сейсмического состояния исследуемых территорий служили обобщенные и полученные ранее данные по скоростям продольных (v_p) и поперечных (v_s) волн [Геология..., 1985; Сейсмотектоника..., 1993; Сейсмическое микрорайонирование..., 1998; Джурик и др., 2003; Районирование..., 2011]. Их краткий анализ в верхнем слое земной коры в пределах Муйской впадины приводит к следующим результатам (таблица).

На разрезах, представленных скальными грунтами, скорости определяются различной степенью выветривания горных пород. До глубины 13—15 м они характеризуются значениями v_p , равными 1000—1100 и v_s 470—580 м/с. Слабовыветрелые коренные породы имеют повышенные значения v_p от 1690 до 2720 м/с и v_s от 730 до 1420 м/с. Ниже, с глубиной, скорость быстро увеличивается и достигает значений 4200 м/с. Отношение продольных волн к поперечным меняется от 1.6 для плотных пород до 2.1 для разрушенных. Наибольшее число измерений для относительно сохранных и мерзлых коренных пород приходится на значения, близкие к 3000 м/с (см. таблицу).

В общем, в рыхлых отложениях впадины с увеличением мощности слоя мерзлых грунтов средние значения v_p и v_s возрастают. Градиент увеличения скоростей от мощности слоя с глубиной снижается.

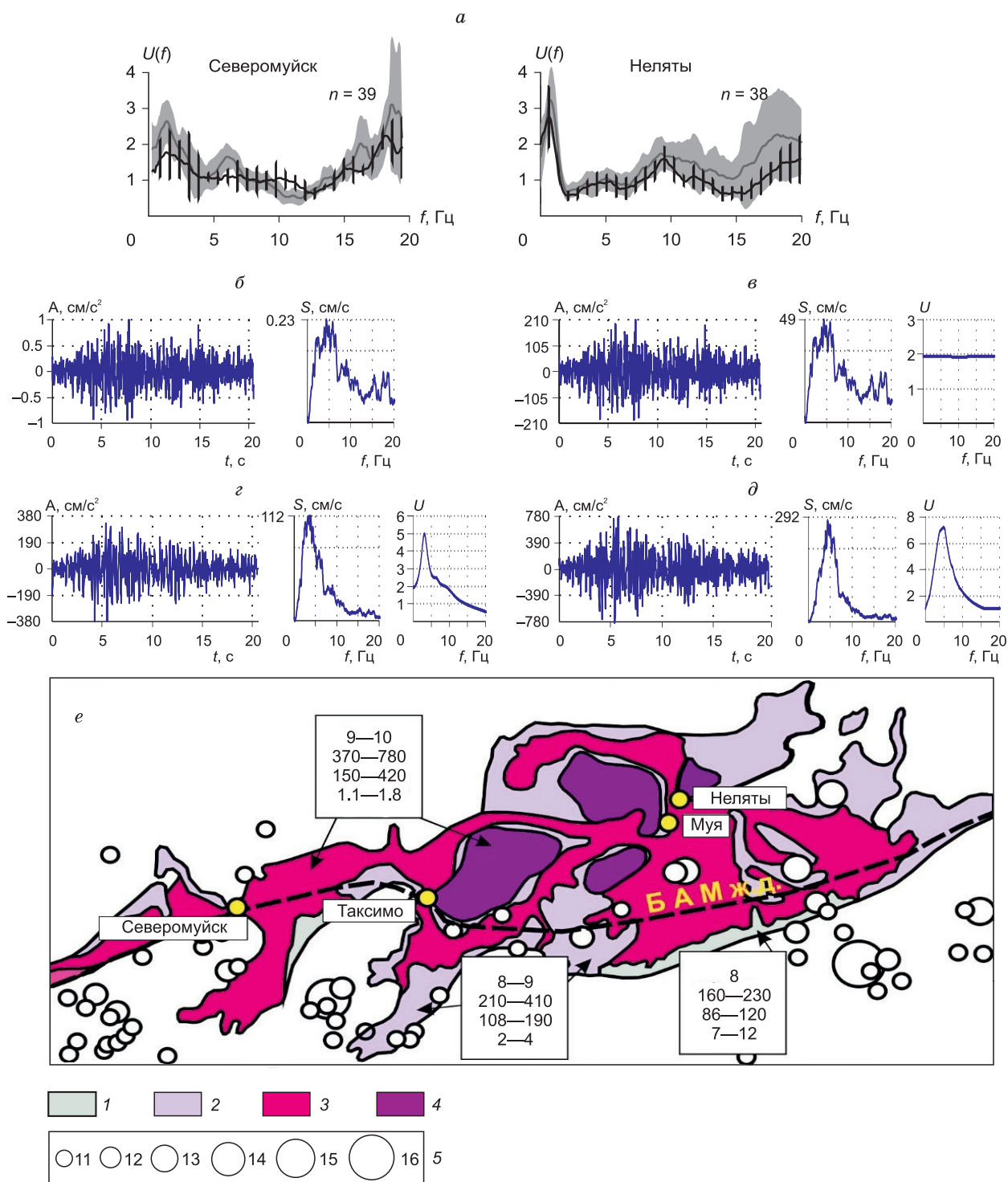


Рис. 2. Реализации прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений при деградации мерзлоты на примере Муйской впадины (БСЗ).

a — частотные характеристики землетрясений, использованные для формирования исходного сигнала; *б, в, г и д* — сформированная, нормированная исходная акселерограмма и расчетные акселерограммы (*A*), их спектры (*S*) и частотные характеристики (*U*) для грунтов I, II и III категорий соответственно; *е* — карта-схема: 1—4 — основные комплексы осадочных пород (1 — пролювиально-делювиальный, 2 — аллювиально-пролювиальный, 3 — аллювиальный, 4 — озерно-аллювиальный), 5 — энергетический класс землетрясений. В квадратах сверху вниз соответственно: сейсмическая опасность в баллах, максимальные ускорения для горизонтальной компоненты (см/с²), максимальные ускорения для вертикальной компоненты (см/с²), резонансные частоты (Гц): слева — естественное состояние, справа — прогнозируемое.

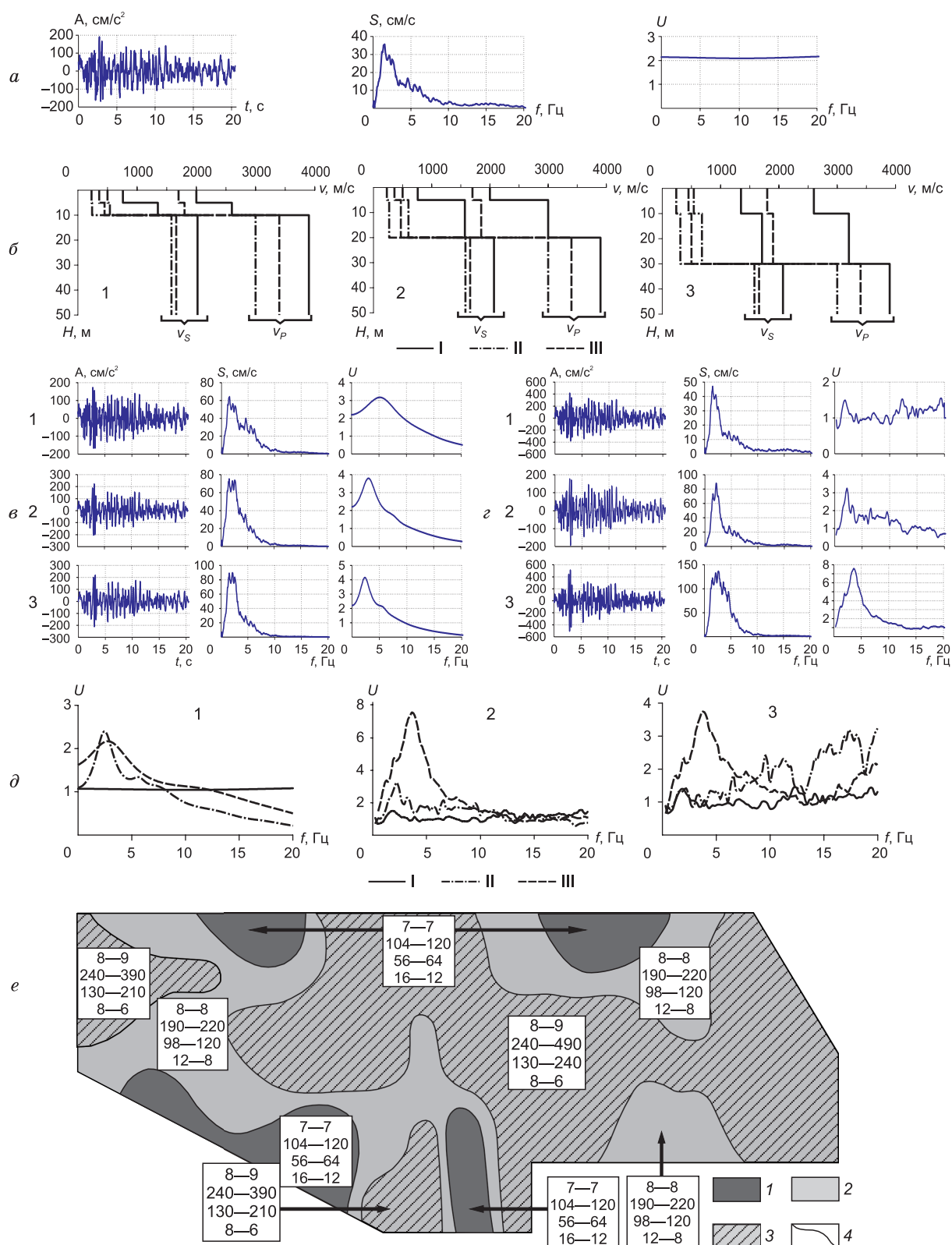


Рис. 3. Реализация прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений при деградации мерзлоты на примере Бурэнханского ГОКа (Монголия).

а — сформированная акселерограмма для эталонных коренных пород (A), ее спектр (S) и частотная характеристика (U); **б** — наиболее вероятные сейсмические модели для 10- (1), 20- (2) и 30-метровой (3) толщи рыхлых песчано-глинистых отложений (I — твердомерзлые, II — воздушно-сухие, III — водонасыщенные); **в** — расчетные акселерограммы, их спектры и частотные характеристики для рыхлых неводонасыщенных грунтов общей мощностью 10 (1), 20 (2) и 30 (3) м соответственно; **г** — аксе-

Обобщенные значения v_P , v_S и v_P/v_S в преобладающих разновидностях грунтов по их составу и состоянию в районе Муйской впадины

Тип грунта	Скорости P - и S -волн, м/с	Талые воздушно-сухие	Талые водонасыщенные	Сыпучемерзлые $t \leq 0^\circ\text{C}$	Слабодыстые $t \leq 0^\circ\text{C}$	Твердомерзлые $t \leq 1^\circ\text{C}$
Песок	v_P v_S v_P/v_S	440—690 200—330 2.2	1500—1800 300—600 4.0	850—1290 230—650 2.1	1380—2180 660—1150 2.0	3200—3700 1620—2060 1.9
Галечник с песком	v_P v_S v_P/v_S	590—860 270—430 2.1	1600—1900 360—700 3.5	1100—2200 530—1160 2.0	1980—3160 980—1760 1.9	3400—3900 1790—2230 1.8
Коренные породы	v_P v_S v_P/v_S	1900—2300 960—1240 2.0	2300—2700 920—1280 2.3	2000—2500 980—1320 1.95	2300—3100 1210—1830 1.8	3400—4200 1890—2600 1.7

При переходе маловлажных грунтов в водонасыщенное состояние наблюдается резкое увеличение скоростей продольных волн в 3—4 раза. Скорости поперечных волн возрастают менее интенсивно в 1.1—1.5 раза [Методическое руководство..., 1988]. Отношение скоростей в приповерхностной части разреза может достигать 4—5, с глубиной v_P/v_S снижается и для водонасыщенных рыхлых грунтов эта величина приближается к 2.5.

Отмеченные закономерности сохраняются и для территории Бурэнханского ГОКа, поэтому в дальнейшем для этого участка они представляются в виде расчетных сейсмогрунтовых моделей для естественного и прогнозируемого состояния грунтовых слоев. Модели характеризуются изменением с глубиной акустических жесткостей, продольных и поперечных волн.

Представленные данные о скоростях сейсмических волн и имеющиеся сведения о строении верхней зоны позволили построить необходимое количество сейсмических моделей до монолитных «эталонных» коренных пород с учетом мерзлотных и гидрогеологических условий для исследуемых территорий.

Акселерограмма, соответствующая исходной сейсмичности территории, сформирована по изложенной методике для выбранных площадок в соответствии с данными по относительно сильным землетрясениям. Для первой площадки были отобраны землетрясения, зарегистрированные сеймостанциями Байкальского филиала ЕГС СО РАН «Северомуйск» и «Неяты» (см. рис. 2, а). В число отобранных записей вошли землетрясения с энергетическим классом >9 и эпицентральной расстоянием до 300 км. Последнее зависело от магнитуды зарегистрированных землетрясений. Общее количество обработанных трехкомпонентных записей ускорений равно 77.

Показательными для представления являются частотные характеристики (см. рис. 2, а), которые использовались для приведения отобранных записей землетрясений к «эталону», соответствующему грунтам первой категории по сейсмическим свойствам и способу спектральных отношений [Nakamura, 1989].

Для каждого отобранного землетрясения рассчитывались амплитудные и фазовые спектры с помощью прямого преобразования Фурье. Далее сформированная нормированная акселерограмма (см. рис. 2, б) масштабировалась на уровень принятой сейсмичности, равной восьми баллам для грунтов I категории, и использовалась как исходная по сейсмическим свойствам для «Муйской впадины». Сами результаты такого подхода представляются на примере контрастных по сейсмическим свойствам грунтов I, II, и III категорий для сейсмогрунтовых моделей (см. рис. 2, в, г, д). Они показывают, что для расчетной исходной акселерограммы (см. рис. 2, б) максимальные значения ускорений для горизонтальной компоненты соответствуют значениям 210, 380 и 780 см/с² для грунтов I, II и III категорий соответственно. При этом максимумы спектров имеют значения 49, 380 и 780 см/с на частотах от 3 до 6 Гц.

Выявляется относительно меньшее значение резонансной частоты для воздушно-сухих (3 Гц) грунтов по отношению к водонасыщенным (5 Гц) одинаковой мощности, равной 30 м. Эта закономерность сохраняется и для других расчетных моделей. Оценка сейсмической опасности грунтов в водонасыщенном состоянии проведена при использовании экспериментальных частотных характеристик. Более подробно это изложено для участка Бурэнхан [Complex..., 2004].

лерограммы и их спектры, рассчитанные при использовании экспериментальных частотных характеристик (1 — эталонные породы, 2 — воздушно-сухие рыхлые грунты, 3 — водонасыщенные рыхлые грунты; д — расчетные (1) и экспериментальные (2) частотные характеристики и их отношения (3); е — карта-схема: 1 — коренные эталонные породы, 2 — рыхлые мерзлые и талые неводонасыщенные грунты, 3 — рыхлые мерзлые и талые водонасыщенные грунты, 4 — граница зон с различными расчетными параметрами сейсмических воздействий; в квадратах сверху вниз то же, что и на рис. 2.

Обобщающие результаты в виде карты-схемы представляются для двух компонент (см. рис. 2, е). Для естественного (мерзлого) состояния грунтов впадина разделяется на участки 8—9 баллов, а максимальные ускорения колебаний грунтов будут находиться в пределах от 160 до 370 см/с² для максимальной горизонтальной компоненты и от 86 до 150 см/с² для вертикальной компоненты. Для прогнозируемого талого состояния она разделяется на участки от 8 до 10 баллов, а максимальные ускорения будут лежать в пределах от 230 до 780 см/с² для компоненты *NS* и от 120 до 420 см/с² для компоненты *Z*.

Для участка строительства Бурэнханского ГОКа (Монголия) использовался исходный сигнал, сформированный по изложенной выше методике для грунтов первой категории, на основе сильных землетрясений, произошедших за последние два года в районах Байкало-Монгольского региона [Джурик и др., 2021б]. Его основные параметры следующие (см. рис. 3, а): продолжительность колебаний 20 с; интервал частот спектра на уровне 0.5 от максимума для горизонтальной и вертикальной компоненты (*NS* и *Z*) меняется от 0.93 до 3.08 Гц; на уровне 0.7 от максимума — от 1.07 до 2.73. Максимальное значение спектра, равное 35.3 см/с, приходится на частоту 1.51 Гц.

Наиболее вероятные сейсмические модели для естественного (мерзлого) и прогнозируемых (воздушно-сухого и водонасыщенного) состояний показаны на рис. 3, б для 10-, 20- и 30-метровой толщи рыхлых песчано-глинистых отложений. Прогноз скоростей при переходе грунтов из мерзлого в воздушно-сухое и далее в водонасыщенное состояние проведен по методике, изложенной в работе [Методическое руководство..., 1988].

В результате по параметрам v_p , v_s и v_p/v_s они входят в интервалы их значений для рыхлых грунтов, приведенных в таблице. Из представленных девяти моделей (см. рис. 3, б) расчеты для примера представлены для трех, характеризующих талое воздушно-сухое состояние грунтов. Они показывают, что расчетные максимальные ускорения для указанных выше мощностей рыхлых отложений достигают значений 210—280 см/с², максимальные значения спектра увеличиваются с возрастанием мощности рыхлых грунтов от 68, 79 до 94 см/с. При этом, в соответствии с показанием расчетных частотных характеристик, резонансные частоты уменьшаются от 5.5 до 3.2 и далее до 2.4 Гц при возрастании их уровня от 3.2, 3.7 до 4.2 соответственно для 10-, 20- и 30-метровой мощности рыхлых отложений.

Для сравнения результатов теоретических расчетов приведены акселерограммы и их спектры, полученные при использовании экспериментальных частотных характеристик (см. рис. 3, в, 1—3). Они реализованы по данным одновременной регистрации микросейсм на эталонных (I) и аналогичных по составу и состоянию воздушно-сухих (II) и водонасыщенных (III) рыхлых грунтах мощностью, равной 24 м [Сейсмогеология..., 1993]. В результате расчетов, выполненных согласно (1), по сравнению с эталонными грунтами интенсивность колебаний исходного сигнала для воздушно-сухого состояния грунтов увеличивается для максимальной горизонтальной компоненты от 104 до 193 см/с² и для водонасыщенного состояния до 490 см/с².

Представленные экспериментальные частотные характеристики позволяют нам провести их прямое сравнение с расчетными, реализованными по выбранной методике (см. рис. 3, в, 1). Для наглядного сравнения они представлены повторно на рис. 3, в, 2, а их отношение на рис. 3, в, 3. Анализ такого сопоставления резюмируется следующим образом. По расчетным частотным характеристикам максимальное значение по уровню имеют неводонасыщенные грунты, и их максимум по частоте несколько ниже по отношению к слою водонасыщенных грунтов такой же мощности (см. рис. 3, в, 1). Экспериментальные характеристики показывают, что по отношению к эталонным уровень кривых увеличивается до 3.3 для воздушно-сухого состояния и до 7.5 для обводненных грунтов. При этом максимумы смещаются в сторону высоких частот от 2.0—2.5 до 4 Гц (см. рис. 3, в, 2). То есть по частотному составу направленность увеличения интенсивности колебаний по расчетным и экспериментальным кривым при переходе от мерзлых к неводонасыщенным и далее к водонасыщенным сохраняется в соответствии с повышением частоты.

Количественное различие их уровней в зависимости от частоты, непосредственно по их отношению, показаны на рис. 3, в, 3. Для грунтов I (коренные твердомерзлые и эталонные грунты) и II (воздушно-сухие рыхлые грунты) категорий согласие хорошее, их отношения в пределах частот от 0 до 7 Гц практически совпадают и различия не превышают ± 1.2 . Далее в относительно высокочастотной области (за пределами основных частот спектра исходного сигнала на уровне 0.3 от максимума > 7 Гц), которая не влияет на основные проявления сейсмичности исследуемой территории, отмечается увеличение различий для воздушно-сухих рыхлых грунтов. Это может быть связано с повышением уровня микросейсм и наличием слоев малой мощности с различной акустической жесткостью в верхней зоне разреза.

Для водонасыщенного состояния рыхлых грунтов различия расчетных, выполненных при использовании метода тонкослоистых сред [Ратникова, 1973] и экспериментальных данных, существенны, в области значимых частот от 1—2 до 6 Гц они достигают значений 2.0—3.5. Разница в оценке сейсмической опасности может доходить до одного балла, что требует соответствующей корректировки расчетных данных [Джурик и др., 2021в]. Различия объясняются величинами изменения скоростей v_p и v_s волн

в грунтах при изменении их состояния (см. таблицу). Значения v_p при переходе в водонасыщенное состояние значительно увеличиваются (возможно, в 2—4 раза), а v_s в рассматриваемых двух состояниях сравнимы между собой или даже могут увеличиваться [Джурик, 1986]. Кроме того, расчеты проводились для максимальной горизонтальной компоненты, при реализации которых скорости поперечных волн имеют существенное значение [Сейсмические свойства..., 1986]. При переходе от воздушно-сухих грунтов к водонасыщенным динамические модули упругости возрастают, и в соответствии с ними, по данным теоретических расчетов, уменьшается интенсивность сейсмических колебаний. То есть их «кажущаяся» сейсмическая опасность снижается, что противоречит реальным проявлениям сейсмичности в водонасыщенных грунтах одного и того же состава по сравнению с их воздушно-сухим состоянием, которая напрямую связана со значительным уменьшением прочностных показателей водонасыщенных грунтов по отношению к мерзлым и воздушно-сухим как в рыхлых, так и в скальных породах [Джурик и др., 2019].

В итоге, согласно проведенным теоретическим расчетам и экспериментальным данным, территория строительства Бурэнханского ГОКа при принятой исходной сейсмичности, равной 8 баллам, для естественного состояния грунтов разделяется на участки 7 и 8 баллов. Максимальные ускорения колебаний грунтов будут находиться в пределах от 104 до 240 см/с² для максимальной горизонтальной компоненты и от 56 до 130 см/с² для вертикальной компоненты. Для прогнозируемого талого состояния район ГОКа разделяется на участки от 7 до 9 баллов и максимальные ускорения будут лежать в пределах от 120 до 490 см/с² для компоненты *NS* и от 64 до 240 см/с² для компоненты *Z*. Основные максимумы частотных характеристик при оттаивании мерзлоты для рассматриваемых территорий в большинстве случаев смещаются в сторону низких частот.

При деградации мерзлоты и переходе ее в талое водонасыщенное состояние на данном этапе исследований предпочтение отдается комплексному подходу к изучению сейсмокриодинамики Байкало-Монгольского региона. Выполненные работы основаны на теоретических расчетах, использующих реальные и прогнозируемые значения скоростей сейсмических волн и экспериментальные оценки изменения проявлений сейсмичности при нарушении естественного состояния мерзлоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщены ранее проведенные исследования и получены новые данные для конкретных территорий: от анализа изосейст сильных землетрясений, связанных, в свою очередь, с проявлениями сейсмичности Байкало-Монгольского региона, до реализации прогноза сейсмических воздействий сильных землетрясений при деградации мерзлоты на примере конкретных территорий, расположенных в различных сейсмоклиматических зонах. Представленные карты-схемы могут являться основой изучения пространственно-временной неоднородности поведения криолитозоны при температурных, техногенных (вызывающих деградацию мерзлоты) и сейсмических нагрузках.

Предложенный и реализованный комплексный подход позволил получать для естественного и прогнозируемого состояний грунтов в основаниях проектируемых сооружений набор сейсмических характеристик (акселерограмм, спектров, частот) и основных параметров сейсмических воздействий для прогнозируемых сильных землетрясений (максимальных ускорений, преобладающих частот, максимумов спектров и резонансных частот). Отмеченные характеристики и параметры сейсмических воздействий являются необходимыми данными для проектирования и строительства сейсмостойких сооружений в различных сейсмоклиматических зонах Байкало-Монгольского региона.

В то же время отмечается, что если за критерий при деградации мерзлых грунтов и изменении их состояния, по данным выбранных теоретических расчетов, взять уровень и частотный состав их колебаний при сильных землетрясениях, то водонасыщенные грунты одного и того же состава в сейсмическом отношении лучше, чем воздушно-сухие, что не соответствует проявлениям сейсмичности при сильных землетрясениях и представленным нами экспериментальным данным. В этом отношении в направлении изучения сейсмокриодинамики открывается возможность создания надежной экспериментальной и физической основы для разработки методики построения динамических физико-геологических моделей ВЧР в условиях распространения вечной мерзлоты. Такой подход частично реализован для площадки Бурэнханского ГОКа, который определяет в первом приближении круг необходимой исходной информации о параметрах начального состояния мерзлотного разреза, что открывает возможность последующего уточнения прогнозных сейсмогрунтовых моделей и использования новых расчетных методов оценки сейсмических воздействий с учетом изменения физического состояния мерзлоты.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44011. В работе использовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН в рамках гранта № 075-15-2021-682, а также данные, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

ЛИТЕРАТУРА

- Васильев В.И., Шешеня Н.Л., Чеховский А.Л.** Формирование инженерно-геологических условий Центральной Монголии. М., Наука, 1987, 144 с.
- Геокриологическая карта МНР.** М-6 1:1 500 000 / Ред. С.Ю. Пармузин. Уланбаатар, ГУГК МНР, 1981.
- Геология и сейсмичность зоны БАМ.** Инженерная геология и инженерная сейсмология. Новосибирск, Наука, 1985, 192 с.
- Дженкинс Г., Баттс Д.** Спектральный анализ и его приложения. М., Мир, 1971, вып. 2, 257 с.
- Джурик В.** Инженерно-сейсмологический прогноз при нарушении естественного состояния мерзлых грунтов: Автореф. дис. ... д. г.-м. н. Иркутск, 1986, 38 с.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Басов А.Д.** Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолитозоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2000, 270 с.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф.** Динамика сейсмического риска при температурных изменениях в криолитозоне // Криосфера Земли, 2003, т. 9, № 4, с. 37—40.
- Джурик В.И., Ключевский А.В., Серебренников С. П., Демьянович В.М., Батсайхан Ц., Баяраа Г.** Сейсмичность и районирование сейсмической опасности территории Монголии. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2009, 420 с.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю.** Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов // Вулканология и сейсмология, 2015, № 5, с. 1—11.
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П.** К разработке региональной методики прогноза параметров сейсмических воздействий восточного фланга Байкальской сейсмической зоны при деградации мерзлоты // Международный научно-исследовательский журнал, 2019, № 11 (89), с. 92—97.
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П., Ескин А.Ю.** Динамика спектрального состава колебаний приповерхностного слоя годовых вариаций температур при землетрясениях в Байкальском регионе // Геология и геофизика, 2020, т. 61(8), с. 1136—1146.
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Батсайхан Ц., Серебренников С.П., Ескин А.Ю.** Сейсмодинамика Байкало-Монгольского региона и прогноз сейсмических воздействий сильных землетрясений при деградации мерзлоты // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. VIII Международный симпозиум, тезисы докладов (28 июня — 2 июля 2021 г.), Бишкек, 2021а, с. 274—276.
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Батсайхан Ц., Серебренников С.П., Шагун А.Н., Ескин А.Ю.** Спектральный анализ сильных землетрясений и прогноз сейсмических воздействий Байкало-Монгольского региона // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов (Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием). Петропавловск-Камчатский, 2021б, с. 167—171, doi: 10.35540/903258-451.2021.8.30.
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю.** Предварительная оценка проявлений прогнозной сейсмичности на участке материк—Сахалин для критически важного линейного сооружения // Тихоокеанская геология, 2021в, т. 40, № 5, с. 74—85.
- Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии.** М., Наука, 1985, 224 с.
- Зорин Ю.А.** Новейшая структура и изостазия Байкальской зоны и сопредельных территорий. М., Наука, 1971, 167 с.
- Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию.** М., Наука, 1988, 280 с.
- Оганесян В.В.** Климатические изменения как факторы риска для экономики России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2019, № 3 (373), с. 161—184.
- Ратникова Л.И.** Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах. М., Мир, 1973, 124 с.
- Районирование сейсмической опасности территории города Эрдэнэт.** Иркутск, ИЗК СО РАН, 2011, 120 с.
- Сейсмотектоника и сейсмичность Прихубсугулья.** Новосибирск, Наука, 1993, 180 с.
- Сейсмическое микрорайонирование аймачных центров Монголии.** Улаанбаатар, АНМ, 1998, 248 с.
- Сейсмические свойства скальных грунтов.** Новосибирск, Наука, 1986, 132 с.
- Солоненко В.П.** Особенности сейсмических проявлений в условиях вечной мерзлоты // Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы. Новосибирск, Наука, 1977, с. 279—284.

Briggs M.A., Campbell S., Nolan J., Walvoord M.A., Ntarlagiannis D., Day-Lewis F.D., Lane J.W. Surface geophysical methods for characterising frozen ground in transitional permafrost landscapes // *Permafrost Periglacial Processes*, 2017, v. 28 (1), p. 52—65.

Complex geophysical and seismological investigations in Mongolia / Eds. V.I. Dzhurik, T. Dugarmaa. Ulaanbaatar — Irkutsk, 2004, 315 p.

Nakamura Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // *Q. Rep. Railway Tech. Res. Inst.*, 1989, v. 30, p. 25—33.

Gupta I.D., Trifunac M.D. Empirical scaling relations for pseudo relative velocity spectra in western Himalaya and northeastern India // *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 2018, v. 106, p. 70—89.