

КОНЦЕПЦИЯ ПРОГНОЗА СЕЙСМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗВИТИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

Серебренников С.П., Джурик В.И., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: serebr@crust.irk.ru

Прогноз сейсмического состояния территорий развития криолитозоны, подверженных влиянию антропогенной деятельности, решается путем изучения сейсмичности территорий, изменений физических, упругих и прочностных свойств мерзлоты при нарушении их температурного режима. Материалы исследований динамики сейсмического риска и влияния антропогенных процессов представлены на примере крупных геологических структур Байкальской рифтовой зоны (хребты Удокан, Кодар и Чарская впадина). Направленность этих изменений приводит к увеличению сейсмической опасности грунтов в основаниях сооружений. На основании результатов геофизических расчетов, уточненной исходной сейсмичности, инженерно-геологических и мерзлотных сведений проведена оценка сейсмической опасности территории при естественном состоянии грунтов и вариантов прогноза при развитии деградации криолитозоны. Основные неблагоприятные факторы, определяющие устойчивость геологической среды: наличие разнообразных ландшафтных комплексов, мерзлое состояние пород, землетрясения, разнообразный спектр физико-геологических процессов.

Ключевые слова: сейсмичность, техногенная опасность, инженерная геология, грунты, прогноз

CONCEPT OF SEISMIC-EFFECT PREDICTION IN CONDITIONS OF CRYOLITE ZONE

Serebrennikov S.P., Dzhurik V.I., Bryzhak E.V., Eskin A.Yu.

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, e-mail: serebr@crust.irk.ru

Seismic-effect prediction in conditions of cryolite zone affected by anthropogenic activities is made through the study of seismicity of the areas and change of physical, elastic and strength properties of permafrost because of a change in soil temperature regimes therein. These changes tend to increase the risk of earthquake-induced instability of the ground underneath foundations. The study materials on dynamics of seismic risk and influence of anthropogenic processes are presented in terms of large geological structures in the Baikal rift zone (Udokan and Kodar Mountains and Chara Basin). Geophysical calculations, refined initial seismicity and engineering-geological and permafrost data were used for seismic hazard assessment for the areas where the soil conditions are natural and for derivation of earthquake scenarios at permafrost degradation. Major unfavorable geological factors of the environment are landscape variety, permafrost, earthquakes, and a wide range of physical-geological processes.

Keywords: seismicity, technogenic danger, engineering geology, soils, prediction

Под изменением сейсмического риска территорий криолитозоны понимается изменение во времени и пространстве строения и сейсмических параметров пород, которые меняются в соответствии с изменением физических, упругих и прочностных свойств мерзлоты при нарушении их температурного режима. Концепция прогноза сейсмического состояния территорий криолитозоны, подверженных влиянию антропогенной деятельности, приобретает все большее значение и в первую очередь в пределах влияния активных сейсмических зон. Задача прогноза степени изменения сейсмического риска решается путем изучения сейсмичности территорий, моделирования, экспериментальных измерений и путем теоретических расчетов.

Для прогноза изменения инженерно-геологических условий немаловажное значение имеет опыт освоения в аналогичных природных условиях. В настоящее время опыт строительства, эксплуатации и развития БАМ, строительства и проектирования

подъездных железнодорожных и автомобильных дорог к месторождениям полезных ископаемых предоставляет возможность прогноза изменений геологической среды и усовершенствования существующих подходов для прогноза изменения сейсмической (техногенной) опасности территорий промышленного и гражданского строительства на территории развития многолетне-мерзлых грунтов.

Оценка техногенной опасности дифференцируется в рамках выделенных нами участков, поскольку деформации поверхности, сопровождающие неизбежную деградацию ММП, зависят от типов пород, слагающих основные морфоструктуры.

Материалы и методы исследования

Главная роль в формировании уровня сейсмичности района региона в целом отводится Становой зоне возникновения очагов землетрясений (западный фрагмент). Зона охватывает обширную территорию и включает в себя систему разломов в областях сочленения впадин и горных сооружений. Высокий сейсмический потенциал зоны подтверждается наличием нескольких сильных землетрясений и боль-

шим количеством сейсмических событий более низкого ранга.

Наряду с сейсмологическими данными для оценки исходной сейсмичности использовались материалы сейсмогеологического изучения региона. При составлении карты сейсмического районирования специалистами (60–70 годы XX века), был выявлен ряд сеймотектонических и сейсмогравитационных палеосейсмогенных структур хребта Удокан (Нижнеингамакитская и Чина-Вакатская и др.) и хребта Кодар (Апсат). Совокупность сейсмологических и сейсмогеологических данных позволила им утверждать, что структура образовалась в недавнем прошлом в результате землетрясений силой в 9 баллов и выше [1]. Авторы статьи провели дополнительные исследования по изучению вышеописанных структур. Уточнение границ структур и наличие тектонических структур более низкого порядка на исследуемой площади (сейсмогеологические и геофизические материалы) и данные о современных землетрясениях указывают на активность структур и в настоящее время. Наглядно высокий уровень сейсмичности характеризует карта эпицентров землетрясений с 6-го энергетического класса (рисунок).

Для оценки техногенного воздействия использована информация о мерзлотных и инженерно-геологических особенностях района в целом. Изменение естественного состояния криолитозоны и активизация экзогенных процессов вследствие строительства и эксплуатации промышленных объектов – вот основные факторы, влияющие на изменение природной обстановки района.

В пределах изучаемой территории расположено несколько инженерно-геологических и мерзлотных комплексов. Анализ геофизических материалов и данных бурения по линейным сооружениям позволил провести оценку инженерно-геологической и криогенной ситуации, и определить возможные участки повышенной техногенной опасности.

Практика инженерно-геологического обследования [2–6] существующих объектов линейных сооружений (железнодорожные пути, автомобильные дороги) позволяет утверждать, что, наиболее сильно техногенному воздействию подвергаются участки мостовых переходов. Здесь равновесие нарушается вследствие необходимости подготовки площадок для мостовых переходов. Удаление рыхлого материала приводит к уменьшению устойчивости склонов, увеличивается угол естественного откоса и происходит интенсивная деградация мерзлоты.

При строительстве мостовых переходов подрезаются борта ручьев и рек (технология строительства), что приводит к активному протаиванию мерзлоты вверх по склону. Еще более осложняет обстановку присутствие зон разломов, которые, как правило, ограничивают впадины и русла ручьев по бортам. Если при строительстве дорог рыхлые отложения убирались по возможности до коренных пород с незначительной льдистостью, то в зонах повышенной трещиноватости и тектонической раздробленности она повышается до появления ледяных жил и брекчий с ледяным цементом. Техногенное воздействие при строительстве таких инженерных сооружений приводит к концентрации талых и дождевых вод, проявлению эрозионных процессов вблизи насыпи и термосадок под ней.

Другими сложными участками строительства линейных сооружений являются переходы через

сухие лога по горным склонам, где отсыпается насыпь высотой до 65 м. На таких участках переходным слоем от относительно крепких скальных к насыпным грунтам служат сильно трещиноватые коренные породы. По данным сейсморазведочных измерений, мощность этого слоя на бортовых участках с понижением к руслам временных водотоков увеличивается от 3 до 8 метров, а в русловой части может достигать 8–12 м. В естественных условиях этот слой перекрывается рыхлыми грунтами мощностью до 4 метров. Нарушение структуры рыхлых поверхностных отложений и наличие временных водотоков приводит к активизации экзогенных процессов.

В пределах пологих участков долин ручьев (р. Сангиях и др.) и пониженных участков впадин (Чарская, Чинейская и др.) выявлены тенденции преобразования инженерно-геологической обстановки вследствие деградации многолетнемерзлых пород (термокарст, термоэрозия, пучение). Особенно чувствительны к изменениям льдистые тонкодисперсные аллювиальные отложения и озерно-болотные образования. Наряду с экзогенными процессами, наблюдаемыми на стадии строительства и эксплуатации, можно более точно оценить последствия техногенного вмешательства, динамику и масштабы необратимых последствий на примере автомобильных дорог, проложенных по склонам хр. Удокан и хр. Кодар, используемых на стадии разведки месторождений.

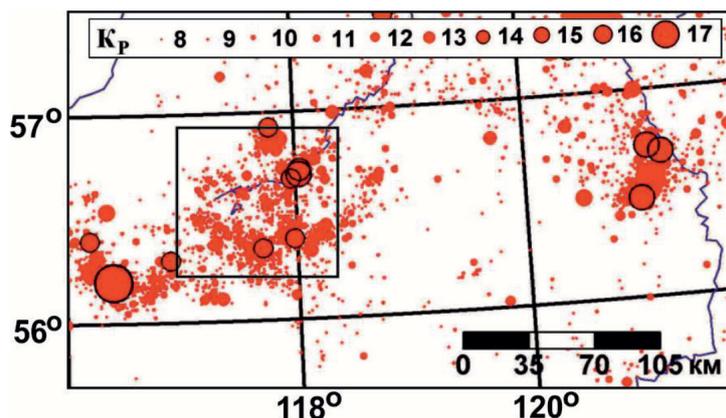
Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки сейсмической опасности грунтов при строительстве мостовых переходов и оснований железнодорожных и автомобильных дорог исследуемой территории получены данные о составе грунтов, их состоянии и о распределении геофизических параметров с глубиной в верхней зоне геологического разреза.

Инженерно-геологический комплекс хребтов Удокан, Кодар и расположенной между ними Чарской впадины представлен образованиями средне- и верхнечетвертичного возраста, современными отложениями и формированиями более позднего периода. Осадочно-метаморфический комплекс объединяет породы нижнего протерозоя. Осадочные образования современного и четвертичного времени формирования представлены различными литологическими комплексами, основные из которых следующие:

1. Комплекс поймы и низких надпойменных террас – галечники, пески и супеси (мощностью до 30 м), наличие льда-цемента и ископаемых льдов [7].

2. Комплекс делювиальных склонов – глыбовые и щебнистые грунты, в качестве заполнителя отмечаются супеси, щебнистые супеси и лед-цемент. Мощность отложений до 8 м. Глубина сезонного протаивания изменяется от 1 м у подножья делювиальных склонов северной экспозиции до 2 м на южных склонах.



Карта эпицентров землетрясений, K_p – энергетический класс землетрясений. Район исследований выделен квадратом, в центре п. Новая Чара (Забайкальский край)

3. Комплекс высоких надпойменных террас и днищ древних долин представлен аллювиальными отложениями песка, суглинков, супесей, галечников и глыб. Особенностью отложений данного комплекса является наличие разнообразных криогенных текстур и льда цемента. Глубина сезонного протаивания достигает одного метра.

4. Комплекс троговых долин – аллювиальные (супеси, пески, галечники) и моренные (галечники, валуны супеси и пески) отложения. В многолетнемерзлом состоянии для них характерны пологоволнистые, линзовидные и корковые криогенные текстуры. Глубина сезонного протаивания варьирует от 0,5 м в центральных и заболоченных частях до 2 м на поверхности южных склонов.

5. Комплекс донной и конечной морен представлен многолетнемерзлыми суглинками, супесью с галькой, валунами и песком. В толще многолетнемерзлых моренных отложений под валунами и галькой, при супесчаном заполнителе наблюдаются мелкие линзовидные льдистые включения. Морфологические особенности и состав моренных отложений обусловили широкий интервал сезонного протаивания – от 1 м в заболоченных ложбинах до 4 метров на склонах.

6. В комплекс конусов выноса входят современные пролювиальные отложения в виде щебнистых и глыбовых грунтов.

В валунно-галечных отложениях конусов выноса лед встречается в виде небольших корок, гнезд и линз. Структура отложений, широкое разнообразие гранулометрического состава обломочного материала и отсутствие растительного покрова обеспечивают глубину сезонного протаивания до 3 метров. Осадочно-метаморфический комплекс представлен метаморфизованными алевритами, филлитами и известковыми песчаниками.

Одним из основных направлений проводимых исследований является выделение в пределах изучаемого района участков с различной сейсмичностью.

По величине она может отличаться от исходной сейсмичности за счет грунтовых, гидрогеологических и мерзлотных условий на один и более баллов [8]. Впервые мнение о возможности контрастного проявления сейсмичности в областях распространения вечной мерзлоты высказано в 1950–1960-е гг. В.П. Солоненко. В более поздних работах для оценки сейсмокриологических условий территорий им составлена в обобщенном виде классификация грунтов и типов вечной мерзлоты [1]. Для оценки сейсмической опасности используется метод сейсмических жесткостей. Расчет приращений балльности проводился по формуле С.В. Медведева [9]:

$$\Delta I = 1,67 Lg(p_3 V_3 / p_1 V_1), \quad (1)$$

где $p_3 V_3$ и $p_1 V_1$ – сейсмические жесткости эталонного и исследуемого грунтов для продольных (V_p) или поперечных (V_s) волн, ΔI – расчетные значения приращений балльности.

Для рыхлых водонасыщенных грунтов к формуле (2) вводится поправка, предложенная авторами, учитывающая глубину залегания уровня грунтовых вод (h):

$$\Delta I_{УГВ} = R \cdot e^{-0,04h^2}. \quad (2)$$

Коэффициент R для участков, где преобладают песчаные и глинистые грунты, принимается равным 1, а где грубообломочные, гравийно-галечные – 0,5. При глубине залегания УГВ ниже 7–10 м поправка $\Delta I_{УГВ}$ не вводится. 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.

Таким образом, для проведения расчетов сейсмической опасности по методу сейсмических жесткостей и построения необходимого набора сейсмологического материала, для реализации расчетных методов авторами использованы все необходимые данные: состав, объемная масса эталонных и исследуемых грунтов, величины слоя талых воздушно-сухих, водонасыщенных и мерзлых грунтов, скорости распространения в них сейсмических волн (табл. 1).

За эталон при расчетах приняты грунты 1 категории (относительно сохранные скальные породы со значениями скоростей продольных волн равных 3000 м/с (средние значения) и объемной массой 2,5 г/см³) согласно нормативным документам [10–12]. Принятые значения входят в интервалы их распределений для скальных грунтов и в среднем в 4 раза превышают наиболее вероятные значения скоростей для талых неводонасыщенных пород. Последние в большинстве случаев принимаются как средние грунты, к которым относится исходная сейсмичность района. Таким образом, грунты со значениями скоростей, соответствующими эталонным,

имеют сейсмическую опасность на один балл меньше исходной и оцениваются в 8 баллов, а участки строительства с крутизной склонов более 15° являются неблагоприятными в сейсмическом отношении, их сейсмическая опасность увеличивается на один балл, а в случае эталонных грунтов – 9 баллов (табл. 2).

Используя изложенный выше подход к оценке сейсмической опасности, проведен расчет приращений сейсмической опасности для каждого инженерно-геологического комплекса, в пределах пунктов сейсморазведочных зондирований относительно выбранного эталона. Расчеты приращений за счет изменения акустических жесткостей и температуры мерзлых пород сведены в табл. 1. В таблице представлены: литологический комплекс (мощность исследуемого слоя до 4 м), значения скоростей продольных V_p и поперечных V_s сейсмических волн, температура грунтов и приращения сейсмической балльности ΔI . Необходимо отметить, что скорость в сезонно талых грунтах не учитывалась, как при выборе скоростей в эталонных грунтах, так и при расчетах приращений балльности.

Таблица 1

Расчет сейсмической опасности

Литологические комплексы	Талые воздушно-сухие грунты	Талые водонасыщенные грунты	Мерзлые ($t < -2^\circ\text{C}$) грунты
1, 3	$V_p = 500\text{--}700$ м/с $V_s = 200\text{--}340$ м/с	$V_p = 1500\text{--}1800$ м/с $V_s = 340\text{--}580$ м/с	$V_p = 3000\text{--}3600$ м/с $V_s = 1650\text{--}2100$ м/с
2, 4, 5, 6	$V_p = 600\text{--}1100$ м/с $V_s = 280\text{--}510$ м/с	$V_p = 1700\text{--}2100$ м/с $V_s = 470\text{--}700$ м/с	$V_p = 3200\text{--}3900$ м/с $V_s = 1770\text{--}2200$ м/с
Эталонные (скальные грунты)	$V_p = 2100\text{--}2800$ м/с $V_s = 1000\text{--}1600$ м/с	$V_p = 2500\text{--}3200$ м/с $V_s = 1200\text{--}1800$ м/с	$V_p = 3000\text{--}4400$ м/с $V_s = 1700\text{--}2400$ м/с

Таблица 2

Комплексы грунтов	Разновидности грунтов	Состояние грунтов, $T^\circ\text{C}$	Рельеф (градус)	ΔI (баллы)	Общая опасность (баллы)
1	Суглинок, песок, галечник	Мерзлые -2°	$<15^\circ$	0,24–0,44	8
2	Глыбовый и щебнистый грунты с супесчаным заполнителем	Мерзлые <-2	$<15^\circ$	0	9
2	Глыбовый и щебнистый грунты с супесчаным заполнителем	Мерзлые <-2	$>15^\circ$	+1	10
3	Супесь, суглинок с гравием и галькой, глыбы	Мерзлые <-2	$<15^\circ$	0	9
4	Валуно-галечный с песчаным и супесчаным заполнителем	Мерзлые <-2	$<15^\circ$	0	9
5	Валуны, глыбы с супесчано-щебенистым заполнителем	Мерзлые <-2	$<15^\circ$	–0,13	9
6	Глыбовый и щебенистый грунты	Мерзлые <-2	$<15^\circ$	–0,1–0,3	9

Для разделения мерзлых пород на пластичномерзлые и твердомерзлые в зависимости от их температуры, а следовательно, и сейсмической опасности использовались данные электроразведки ВЭЗ. Как правило, твердомерзлые породы имеют температуру ниже -2°C и УЭС в десятки тысяч Ом м, а пластичномерзлые, с температурой выше -2°C , характеризуются УЭС до первых тысяч Ом м. Разница в сейсмической опасности между такими породами составляет один балл, а ее степень определяется только их состоянием и температурой. Полученный большой объем измерений позволил охватить все основные разновидности грунтов территории и оценить для них величины приращений балльности относительно выбранного эталона (табл. 1). Результаты расчетов показывают, что относительно выбранного эталона (скальные грунты) приращения сейсмической опасности меняются от $-0,1$ до $+1$ баллов, а за счет угла наклона рельефа местности дополнительно могут увеличиваться на 1 балл.

Заключение

Эксплуатация инженерных сооружений в Байкальском регионе отличается особой сложностью в связи с сочетанием многих неблагоприятных факторов, определяющих устойчивость геологической среды к техногенным воздействиям: сложный рельеф, разнообразие ландшафтных комплексов, мерзлое состояние пород, землетрясения, разнообразный спектр физико-геологических процессов.

Высокий уровень техногенной опасности отмечается на участках с максимальным нарушением естественного состояния природной среды. К ним относятся участки со сложными техническими сооружениями (мостовые переходы и т.п.) и участки инженерно-геологических комплексов с высокой уязвимостью к техногенным воздействиям.

Средний уровень объединяет участки, расположенные в нижних частях склонов, осложненных эрозией, погребенными льдами, каменными россыпями, криогенно-денудационного типа, локальной заболоченностью. Преимущественно дисперсный состав верхней части разреза будет способствовать развитию термоэрозии и пучения.

Участки трассы с низким уровнем опасности отличаются наименьшими изменениями при освоении. Здесь задокументированы преимущественно обломочные отложения с малой льдистостью и скальный грунт.

На основании результатов геофизических расчетов, уточненной исходной сейсмичности, инженерно-геологических

и мерзлотных сведений проведена оценка сейсмической опасности территории. Она представляется следующим образом.

Наиболее опасными участками для строительства и эксплуатации объектов инфраструктуры являются, как правило, те, в основании которых расположены глыбовые и щебнистые грунты с супесчаным заполнителем в мерзлом состоянии ($t < 2^{\circ}\text{C}$) и углом наклона рельефа $> 15^{\circ}$. Сейсмическая опасность данных участков оценивается в 10 баллов. К менее опасным фрагментам площадкам исследований отнесены участки с пологим рельефом и с более высокими плотностными характеристиками грунтов, при этом их температура выше -2°C . Принятая сейсмическая опасность для них оценивается в 8–9 баллов. Сейсмическая опасность грунтов впадин оценивается в 9 баллов.

Работа выполнена по проекту НИР № 0346-2016-002 РК АААА-А-17-1170222500 69-1.

Список литературы

1. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование/ [под ред. Н.А. Логачева]. – Новосибирск: Наука, 1985. – 191 с.
2. Изучение и прогноз сейсмических воздействий в зонах распространения мерзлых грунтов Монголии / С.П. Серебренников [и др.] // The scientific heritage. – 2016. – vol. 1, no 2. – P. 76–80.
3. Ai-lan Che, Zhi-jian Wu, Ping Wang Stability of pile foundations base on warming effects on the permafrost under earthquake motions // Soils and Foundations. – 2014. – vol. 54, no 4. – P. 639–647.
4. Shuangyang Li, Yuanming Lai, Mingyi Zhang, Wenbing Yu Seasonal differences in seismic responses of embankment on a sloping ground in permafrost regions // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2015. – vol. 76. – P. 122–135.
5. Усынин Л.А. Прогноз сейсмических воздействий на основания линейных сооружений в условиях вечной мерзлоты (на примере северо-востока Байкальской сейсмической зоны): автореф. ... канд. геол.-минер. наук. – Иркутск, 2012. – 21 с.
6. Районирование сейсмической опасности протяженных трасс линейных сооружений в Сибирском регионе/ В.И. Джурик [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2009. – № 4. – С. 53–59.
7. Геокриологические условия Забайкальского Севера [под ред. В.П. Солоненко]. – М.: Наука, 1966. – 216 с.
8. Результаты оценки сейсмической опасности участка строительства мостового перехода по экспериментальным и расчетным методам / С.П. Серебренников [и др.] // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2015. – № 3. – С. 68–77.
9. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Гостройиздат, 1962. – 260 с.
10. Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов / В.И. Джурик [и др.] // Вулканология и сейсмология. – 2015. – № 5. – С. 1–11.
11. Основные аспекты методического подхода к оценке сейсмостойкости грунтов. / В.Н. Кутергин [и др.] // Геоэкология. – 2016. – № 1. – С. 56–68.
12. Смирнов В.И., Вахрина Г.Н. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 1. – С. 25–38.