

## ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В УСЛОВИЯХ ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ

© 2022 Б.А. Трифонов<sup>1</sup>, С.Ю. Милановский<sup>1, 2</sup>, В.В. Несынов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Москва, Россия, 101000;

<sup>2</sup>Институт физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, 123242;  
e-mail: igelab@mail.ru

Поступила в редакцию 13.08.2022 г.; после доработки 03.11.2022 г.; принята к публикации 26.12.2022 г.

Многолетнемерзлые породы распространены на территории России во многих горнорудных и нефтяных районах. Часть этих территорий находится в зонах высокой сейсмической активности. В связи с глобальным изменением климата и возможной деградацией мерзлоты, необходимы исследования сейсмических свойств мерзлых и талых грунтов, а также процессов, влияющих на их изменение. Решение этих задач требует оценки влияния природных факторов на спектральный состав и динамический диапазон колебаний верхних слоев разреза при землетрясениях. Оценки влияния краткосрочных (сезонное оттаивание-промерзание активного слоя) и долгосрочных (температурных трендов) факторов на изменение колебаний могут быть использованы для прогноза изменения сейсмических условий в сейсмоактивных районах. Приведены обобщения сейсмических свойств грунтов и их отображения в поле скоростей упругих волн и амплитуд колебаний. Рассмотрен ряд сейсмогеокриологических моделей, которые могут быть использованы для решения инженерно-геокриологических задач в сейсмологии. Обосновывается необходимость проведения мониторинга сейсмических свойств грунтов криолитозоны при деградации мерзлоты. Предлагается подход по оценке сейсмической опасности на основе расчетных методов сейсмического микрорайонирования при изменении сейсмических свойств грунтов.

*Ключевые слова:* мерзлота, сейсмические свойства мерзлых и талых грунтов, мониторинг.

### ВВЕДЕНИЕ

Промышленное освоение районов Сибири и Крайнего Севера — одна из крупнейших проблем народного хозяйства Российской Федерации. Область многолетней мерзлоты занимает более 65% территории России (Национальный..., 2004–2008). В последнее время Арктический регион и Сибирь становятся важными для экономики страны в связи с принятой Госпрограммой развития Арктической зоны Российской Федерации. Согласно этой программе широкому освоению Северного морского пути будет способствовать развитие и строительство железнодорожного и других видов транспорта в Арктике, что должно значительно усилить его экспортную и транзитную функции.

Для укрепления береговой инфраструктуры предусматривается реконструкция портов Диксона, Тикси, Певека и Проведения, некоторые

из которых располагаются в районах с высокой сейсмической активностью (нормативная карта ОСР-2015-А,В,С) (Уломов, 2016). В зону высокого риска попадают экономически важные объекты, в том числе 1590 км трубопровода «Восточная Сибирь — Тихий океан», соединяющего г. Тайшет в Иркутской области и нефтеналивной порт Козьмино в заливе Находка; 1260 км магистральных трубопроводов в ЯНАО; 280 км железной дороги Обская — Бованенково (Анисимов и др., 2022).

Проектирование, строительство и эксплуатация сооружений в районах распространения многолетнемерзлых пород (ММП) имеет большое значение в связи с изменением климата (результат атмосферного потепления) (Анисимов и др., 2022, 2010; Дроздов и др., 2018; Konishchev, 2009; Romanovsky et al., 2010). Изменения в динамике состояния вечной мерзлоты, ее деградация, могут являться результатом не только

атмосферного потепления, но и антропогенного фактора (Воронков, 2009). Под деградацией мерзлоты понимается явление, когда наблюдается устойчивое сезонное оттаивание верхнего горизонта (активного слоя) и опускание кровли ММП (Burn, 2004; Grebenets et al., 2021). Учет локальных эффектов в инженерной сейсмологии, определяющих параметры колебаний при землетрясениях (Павленко, 2020; Семенова, 2015), в случае мерзлоты требует дополнительных исследований влияния температуры на геомеханические и скоростные свойства пород верхней части разреза. Особое место при анализе деградирующей мерзлоты занимают подмерзлотные талики природного и техногенного происхождения. Им, в частности, отводится роль триггера в глобальных климатических эволюционных моделях деградации мерзлоты (Parazoo et al., 2018). С точки зрения сейсмологии зона талика, с учетом ее морфологии по отношению к длине волны, может занимать особое место в мерзлотном разрезе обладая пониженными скоростными, частотными и механическими свойствами (Седов, 1988).

Известно, что сейсмические свойства криолитозоны характеризуются особенностями, обусловленными строением многолетней мерзлоты (Воронков, 2009, Седов, 2008). Они определяют поле упругих волн в мерзлой толще и на ее границах.

Целью настоящей работы является исследование сейсмических свойств грунтов криолитозоны в районах многолетней мерзлоты для решения инженерно-геокриологических и сейсмологических задач. Опыт авторов показывает, что решение такого вида задач возможно только комплексным путем.

## ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Значительна часть арктического региона России и Сибири, сложенная мерзлыми грунтами (Национальный..., 2004–2008), характеризуется повышенной сейсмичностью (Уломов, 2016). Сейсмичности и геодинамике Якутии и Арктического региона России посвящены работы (Козьмин, 1984; Козьмин и др., 2001; Кочетков, Козьмин, 1976; Петров и др., 2015; Imaeva et al., 2019; Imaev et al., 2015). Трудно предсказуемые изменения климата представляют реальную угрозу разветвленной инфраструктуре объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК), гидротехнических сооружений, крупных горных предприятий, линейных сооружений и городов, расположенных на мерзлоте (Анисимов и др., 2012, 2022). При этом для конструкций, расположенных в этих районах, наибольшую опасность представляет таяние вечной мерзлоты,

приводящее к потере прочности несущего основания. Статистические данные показывают, что активное развитие неблагоприятных факторов наблюдается примерно на 50% эксплуатирующихся объектов (Анисимов и др., 2022, 2010), а возможный совокупный экономический ущерб зданиям, инженерным сооружениям и инфраструктуре связанный с деградацией мерзлоты к середине 21 столетия оценивается в 7.5% от валового внутреннего продукта (ВВП) России в 2016 г. (Streletskiy et al., 2019). Дополнительным фактором риска и неопределенности является проявленная сейсмичность на мерзлых либо талых грунтах. В области ММП к сейсмическим характеристикам и свойствам грунтов, слагающих верхнюю зону разреза, от которых зависит интенсивность проявления землетрясений на поверхности добавляются и часто приобретают первостепенное значение такие показатели как температура мерзлых грунтов, льдистость, зернистость пород, мощность мерзлоты и активного слоя (слой сезонного оттаивания), возникновение морозобойных трещин, наличие таликов разной морфологии, наличие подмерзлотных вод — криопэггов. Исследования показывают, что на территории распространения ММП даже частичная деградация мерзлоты приводит к изменению инженерно-сейсмологических условий строительства (Джурик и др., 2011).

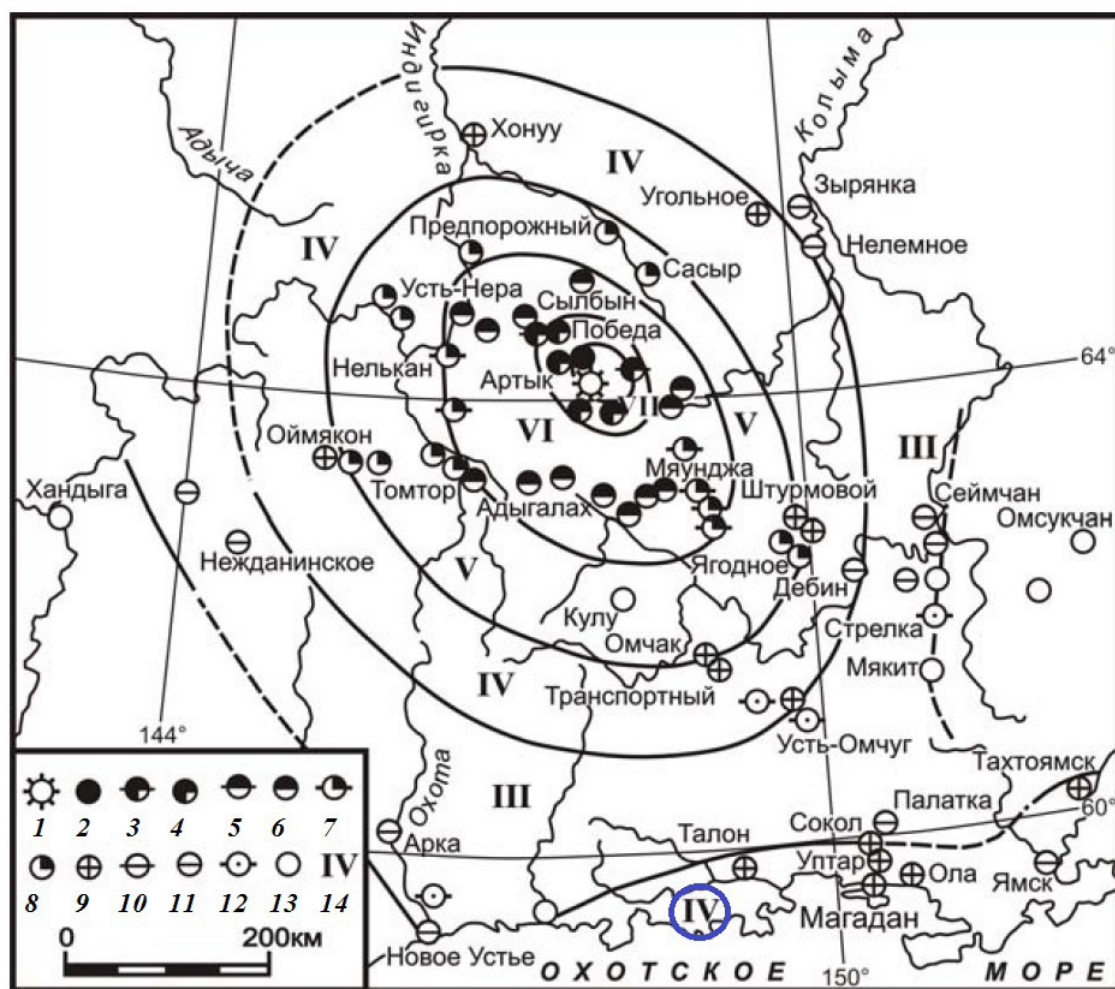
Из результатов исследований на грунтах криолитозоны (Великин, 2020; Воронков, 2009; Джурик и др., 2008, 2009, 2011, 2020; Основы..., 1999; Седов, 1988, 1992; Хрусталеv, 2005) следует, что для проектирования сейсмостойких сооружений, необходимо определение основных сейсмических характеристик (скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн, коэффициенты их затухания  $\alpha_p$ ,  $\alpha_s$ ) и параметров сейсмических воздействий. К последним можно отнести динамические характеристики колебаний грунтов, которые на территории криолитозоны меняются во времени и пространстве и связанные с ними сейсмические параметры (пиковые и максимальные ускорения, преобладающие периоды и длительность колебаний). Все эти параметры меняются с изменением физических свойств мерзлоты при нарушении ее температурного режима и должны учитываться при деградации мерзлоты.

Следует учитывать, что величина  $V_s$ , в отличие от  $V_p$ , практически не изменяется при переходе обломочно-песчаных пород из воздушно-сухого состояния в водонасыщенное, но сильно возрастает, если заполнителем пор является лед. Затухание скорости продольных волн ( $\alpha_p$ ) в «сухих» обломочно-песчаных грунтах в 5–10 раз больше, чем в водонасыщенных, и в 10–20 раз больше, чем при заполнении пор мерзлой породы

льдом (Горяинов, Ляховицкий, 1979; Хрусталеv, 2005). Величина затухания скорости поперечных волн ( $\alpha_s$ ) в «сухих» и водонасыщенных обломочно-песчаных грунтах примерно одинаковые, но значительно уменьшаются, когда поры заполнены льдом. Характер изменения величин  $\alpha_p$  и  $\alpha_s$  в глинистых отложениях при переходе из одного из вышеперечисленных состояний в другое сходен с обломочно-песчаными грунтами. Эти соображения приводят к выводу (Седов, 1988), что при землетрясении одной силы площадь сотрясения мерзлых грунтов должна быть больше, нежели талых. Исследования Б.М. Седова (1988) выявили влияние строения криолитозоны на региональное распределение сотрясаемости при землетрясениях (рис. 1). В зависимости от положения эпицентра по отношению к границе талые породы—ММП, сейсмическое воздействие уве-

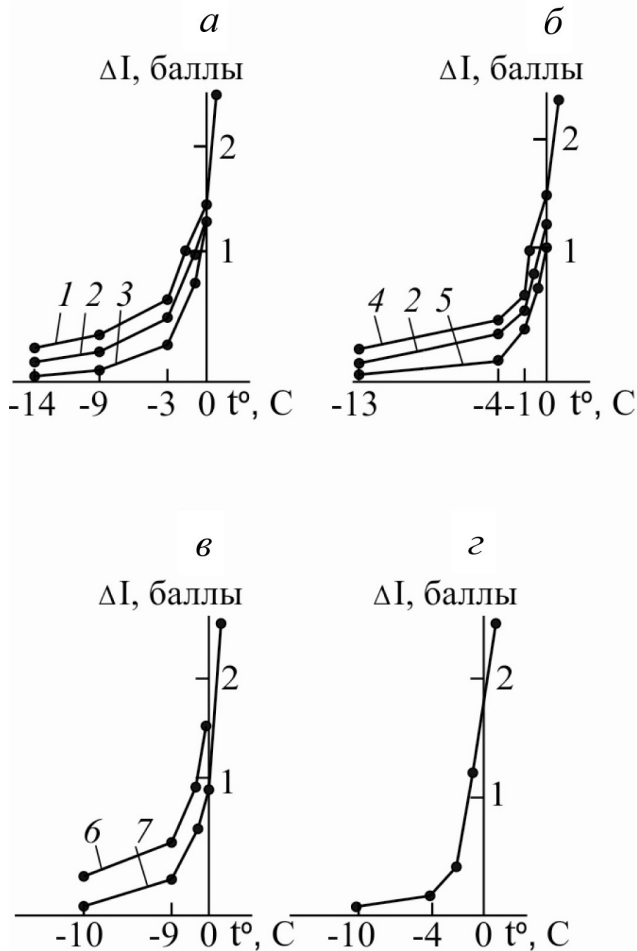
личивается или уменьшается на 1–2 балла. Так, в Магаданском крае землетрясения Камчатской зоны ослабляются, а Черской — усиливаются за счет отражения и рассеяния энергии волн на южной границе мерзлоты, совпадающей с берегом Охотского моря. Артыкское землетрясение (рис. 1) связанное с зоной сильных 7–9 балльных землетрясений по шкале сейсмической интенсивности «MSK-64» неоднократно обсуждалась в литературе (Козьмин, 1984; Козьмин и др., 2001; Кочетков, Козьмин, 1976). Примеры изменения балльности в связи с изменением механических свойств пород зависящих от температуры и влажности приведены на (рис. 2).

Сейсмогрунтовые модели, по которым рассчитываются характеристики сейсмических воздействий, как уже отмечалось, послойно описываются набором параметров: скоростями



**Рис. 1.** Изосейсты Артыкского землетрясения 1971 г. по (Козьмин, 1984; Кочетков, Козьмин, 1976): 1 — эпицентр основного толчка; 2–13 интенсивность сотрясений в баллах: 2 — 8; 3 — (7÷8); 4 — 7; 5 — (6÷7); 6 — 6; 7 — (5÷6); 8 — 5; 9 — 4; 10 — (3÷4); 11 — 3; 12 — (2÷3), 13 — не ощущалось; 14 — сейсмическая интенсивность в баллах. В окружности синего цвета IV — величина балльности в аномальной зоне по (Седов, 1992).

**Fig. 1.** Isoseists of the 1971 Artyk earthquake according to (Koz'min, 1984; Kochetkov, Koz'min, 1976): 1 — epicenter of the main shock; 2 — 13 seismic intensity in points: 2 — 8; 3 — (7÷8); 4 — 7; 5 — (6÷7); 6 — 6; 7 — (5÷6); 8 — 5; 9 — 4; 10 — (3÷4); 11 — 3; 12 — (2÷3), 13 — not felt; 14 — intensity of seismic zones. In the blue circle, abnormal IV — seismic intensity zone according (Sedov, 1992).



**Рис. 2.** Графики приращений сейсмической балльности для грунтов разного состава в зависимости от их температуры и влажности, построенные по результатам экспериментальных исследований (Харитонов, 1980): а — супеси; б — суглинки; в — пески; г — галечники. Водонасыщенность грунта: 1 — 15%; 2 — 21%; 3 — 33%; 4 — 10%; 5 — 20%; 6 — 12%; 7 — 28% (Основы..., 1999).

**Fig. 2.** Graphs of seismic intensity increments for soils of different composition depending on their temperature and moisture, based on the results of experimental studies (Kharitonov, 1980): а — sandy loam; б — loam; в — sand; г — gravel. Water saturation of soil: 1 — 15%; 2 — 21%; 3 — 33%; 4 — 10%; 5 — 20%; 6 — 12%; 7 — 28% (Fundamentals..., 1999).

продольных ( $V_p$ ) и поперечных волн ( $V_s$ ), значениями объемных плотностей ( $\rho$ ), мощностью слоев ( $H$ ), характеристиками затухания. При этом грунтовые комплексы могут находиться в талом воздушно-сухом, талом обводненном, слабльдистом ( $-1^\circ\text{C} < t < 0^\circ\text{C}$ ), твердомерзлом ( $t < -2^\circ\text{C}$ ) состояниях, в которых даже у грунтов одного типа значения скоростей могут очень сильно изменяться в зависимости от агрегатного состояния. В (табл. 1) показаны возможные изменения значений скоростей упругих волн в преобладающих разновидностях грунтов криолитозоны при переходе из одного состояния

в другое в 5–6 раз. Для примера (Восточная Сибирь), рассмотрим пески и супеси, в которых обобщенные значения  $V_p$  и  $V_s$  изменяются соответственно от 500–700 м/с и 250–350 м/с в талом воздушно-сухом состоянии, до 1500–1800 м/с и 300–600 м/с в талом обводненном и 3200–3700 м/с и 1600–2100 м/с в твердомерзлом.

Также соответственно изменяются, рассчитанные по ним (Джурик и др., 2008, 2009) пиковые (максимальные) значения расчетных акселерограмм ( $A_{\max}$ ) и резонансные частоты ( $f$ ): в первом случае равны  $A_{\max} = (380\text{--}480) \text{ см/с}^2$  и  $f = (2.5\text{--}7) \text{ Гц}$ , во втором  $A_{\max} = (690\text{--}750) \text{ см/с}^2$   $f = (6\text{--}11) \text{ Гц}$ , в третьем  $A_{\max} = (180\text{--}210) \text{ см/с}^2$   $f > 20 \text{ Гц}$ . Возможны случаи, когда грунты многолетнемерзлые, а с поверхности талые, или в естественном состоянии представлены чередованием талых неводонасыщенных рыхлых грунтов и твердомерзлых, которые залегают ниже слоя сезонного оттаивания.

Следует также учитывать особенности реакции дисперсных грунтов при их оттаивании (рыхлые пески, пылевато-глинистые грунты в текучем или текучепластичном состоянии) на сильные землетрясения. Такие грунты характеризуются весьма малой прочностью и высокой деформируемостью, а при динамических нагрузках могут быть подвержены при определенных условиях разжижению и течению. Кроме того, уменьшение или увеличение амплитудного уровня колебаний на их поверхности зависит от одновременного влияния нелинейных и резонансных процессов. При деградации дисперсных грунтов криолитозоны необходим особый подход при оценки их реакции на сильные землетрясения, что требует дальнейшего его изучения. Несколько иначе дело обстоит в мерзлых грунтах. Известно, что в обломочно-песчаных и глинистых грунтах при переходе из воздушно-сухого состояния в водонасыщенное, скорость  $V_s$  сильно возрастает, если заполнителем пор является лед. При этом существенно изменяется и отношение  $V_p/V_s$ , которое характеризует прочностные свойства грунта. Частичная деградация мерзлоты может приводить к значительному изменению (ухудшению) сейсмических, связанных с ними инженерно-геологических и сейсмологических условий строительства. При наличии скоростной однородности грунтов в их естественном состоянии, при решении задачи, по определению сейсмической опасности грунтов криолитозоны на первый план выходят прочностные характеристики грунтов, которые помимо состава определяются мерзлотным состоянием (Джурик и др., 2011; Роман и др., 2018).

Расчетные методы как наиболее оперативные и менее трудоемкие широко используются

**Таблица 1.** Скорости упругих волн ( $V_p$  и  $V_s$ ) в преобладающих грунтах криолитозоны на территории Восточной Сибири, обобщенные по результатам экспериментальных исследований (Великин, 2020; Воронков, 2009; Джурик и др., 2008, 2009, 2011)

**Table 1.** Elastic wave velocities ( $V_p$  and  $V_s$ ) in prevailing soils of the permafrost zone in Eastern Siberia summarized from experimental studies (Velikin, 2020; Voronkov, 2009; Dzhurik et al., 2008, 2009, 2011)

| Тип грунта                       | Скорости,<br>м/сек | Состояние грунтов           |                      |                                  |                             |
|----------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|
|                                  |                    | Талые<br>воздушно-<br>сухие | Талые<br>обводненные | Слабодлистые<br>(-1°С < Т < 0°С) | Твердомерзлые<br>(Т < -2°С) |
| Дисперсные породы                |                    |                             |                      |                                  |                             |
| Пески, супеси                    | Vp                 | 500 – 700                   | 1500 – 1800          | 1380 – 2180                      | 3200 – 3700                 |
|                                  | Vs                 | 250 – 350                   | 300 – 600            | 660 – 1150                       | 1620 – 2100                 |
| Галечник, песок,<br>щебень       | Vp                 | 600 – 850                   | 1600 – 1900          | 2000 – 3200                      | 3200 – 3900                 |
|                                  | Vs                 | 280 – 430                   | 360 – 700            | 980 – 1760                       | 1750 – 2200                 |
| Галечниковый и<br>глыбовый грунт | Vp                 | 800 – 1100                  | 1700 – 2100          | 2400 – 2800                      | 3700 – 3900                 |
|                                  | Vs                 | 350 – 500                   | 550 – 700            | 1200 – 1800                      | 1800 – 2400                 |
| Коренные породы                  |                    |                             |                      |                                  |                             |
| Сильнотрещиноватые<br>породы     | Vp                 | 1900 – 3000                 | 2300 – 3200          | 2300 – 3100                      | 3000 – 4200                 |
|                                  | Vs                 | 950 – 1600                  | 1100 – 1600          | 1200 – 1850                      | 1700 – 2400                 |
| Трещиноватые породы              | Vp                 | 2100 – 2800                 | 2500 – 3200          | 2600 – 3200                      | 3400 – 4400                 |
|                                  | Vs                 | 1000 – 1600                 | 1200 – 1800          | 1500 – 1900                      | 1900 – 2600                 |

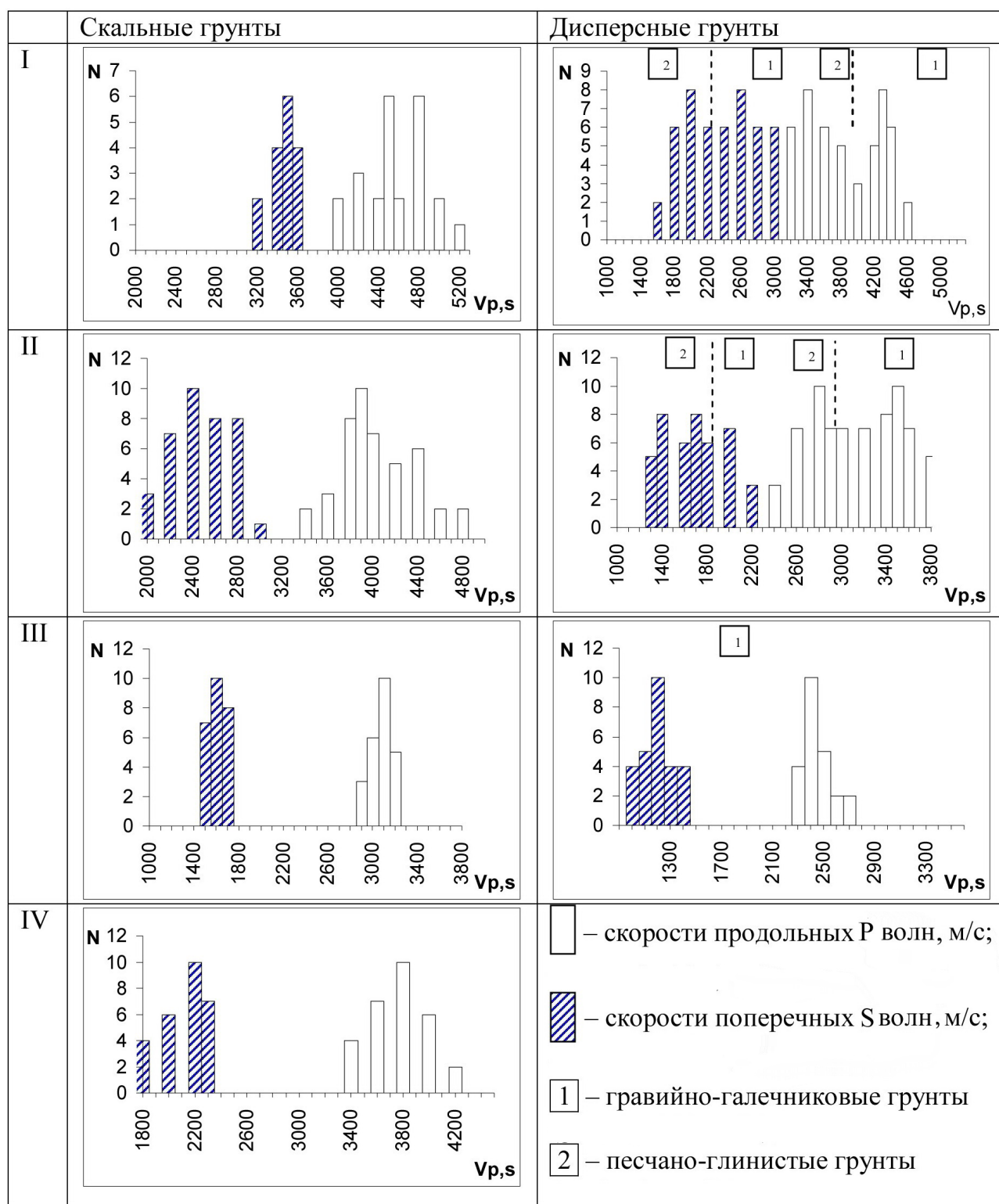
для оценки сейсмоопасности строительных площадок, например в гидростроительстве (Руководство..., 2016). Совокупное применение эмпирических и расчетных методов значительно повышает обоснованность прогнозов сейсмической опасности, выраженных в единицах сейсмической интенсивности либо в форме расчетных акселерограмм. Известно, что грунт изменяет не только динамические характеристики волн (вплоть до полного поглощения или преобразования типа волны), но и свои свойства, причем эти процессы неотделимы друг от друга. Грунты способны также изменять частотный состав сейсмических волн благодаря своим фильтрующим свойствам (Вознесенский, 1999). Эти эффекты обусловлены резонансными явлениями, поглощением из-за не идеальной упругости среды, рассеянием волн на различных неоднородностях, отражением и переизлучением волн на границах слоев. Следует учитывать, что в ряде случаев увеличение сейсмической интенсивности на рыхлых грунтах может сопровождаться не повышением, а понижением уровня колебаний (Дещеревская, Павленко, 2020). Сказанное показывает, что в настоящее время моделирование реакции грунтов при сейсмических воздействиях является одним из важных и в то же время неоднозначных вопросов инженерной сейсмологии.

В тоже время, расчет по сейсмогрунтовым (геосейсмическим) моделям для каждого состояния грунта (воздушно-сухое, водонасыщенное и мерзлое), позволяет получить полный набор

необходимых параметров сейсмических воздействий для строительства сейсмостойких сооружений. Скорости  $V_p$ ,  $V_s$  и характеристики их затухания, необходимые для составления моделей, определяются по результатам сейсмоакустических исследований. Комплексные геофизические исследования (Великин, 2020), наряду с инженерно-геологическими и геокриологическими на ММП, включающие температурные, сейсмические, геоэлектрические, радиоволновые и георадарные исследования должны быть дополнены сейсмологическими. Б.М. Седовым (1988) при сейсмоакустических исследованиях была выявлена высокая акустическая контрастность криологических границ талик-мерзлота, лед – ММП, что следует учитывать при построении геосейсмических моделей. Существенное ослабление R-волн, проходящих через узкие талики, позволяет использовать их по идее Б.М. Седова (1988) для защиты сооружений, возведенных на мерзлых грунтах от сейсмического воздействия за счет создания зоны талых пород по периметру защищаемого объекта.

Были построены гистограммы скоростей для грунтов криолитозоны разных территорий России, которые показывают их региональную изменчивость (рис. 3).

Нами обобщены изменения упругих характеристик скальных и дисперсных грунтов при переходе их из мерзлого состояния в талое (табл. 2). По результатам полевых исследований, проведенных в разные годы (Великин, 2020; Джурик и др., 2008, 2009, 2011; Миндель и др., 2000;



**Рис. 3.** Гистограммы скоростей упругих волн (м/с) в мерзлых скальных и дисперсных грунтах криолитозоны России — Арктика, Сибирь, Дальний Восток и Чукотка, обобщенные по результатам экспериментальных исследований разных авторов (Джурик и др., 2011, 2020; Миндель и др., 2000; Миндель, Трифонов, 2013<sup>1</sup>; Седов, 1988, 1992): I — побережье Ледовитого и Тихого океанов; II — Северо-восточная и Восточная Сибирь и Байкальский регион; III — Забайкалье; IV — Чукотка.

**Fig. 3.** Generalized histograms of elastic wave velocities (m/s) in frozen rock and dispersed soils of the permafrost zone of Russia — Arctic, Siberia and the Far East and Chukotka according to the results of experimental studies by (Dzhurik et al., 2011, 2020; Mindel' et al., 2000; Mindel', Trifonov, 2013<sup>1</sup>; Sedov, 1988, 1992): I — coast of the Arctic and Pacific oceans; II — North Eastern and Eastern Siberia and the Baikal region; III — Transbaikalia; IV — Chukotka.

**Таблица 2.** Скорости сейсмических волн и плотности многолетнемерзлых и талых пород на территории России с учетом материалов экспериментальных исследований (Джурик, 2008, 2009, 2011; Миндель и др., 2000; Миндель, Трифонов, 2013<sup>1</sup>; Седов, 1988, 1992) и материалам ИГЭ РАН и Сибирской геофизической службы (Сас и др., 2020)<sup>2</sup>.

**Table 2.** Seismic wave velocities and densities of frozen and thawed rocks in North-East Russia, taking into account the materials of experimental studies (Dzhurik et al., 2008, 2009, 2011; Mindel' et al., 2000; Mindel', Trifonov, 2013<sup>1</sup>; Sedov, 1988, 1992) and materials of the IGE RAS and the Siberian Geophysical Service (Sas et al., 2020)<sup>2</sup>.

|                                                                                                            | Vp, м/с                  | Vs, м/с                | ρ, г/см³ | T, °C | Vp, м/с                     | Vs, м/с       | ρ, г/см³ | Литературные<br>источники                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------|----------|-------|-----------------------------|---------------|----------|--------------------------------------------------|
| 1                                                                                                          | 2                        | 3                      | 4        | 5     | 6                           | 7             | 8        | 9                                                |
| Побережье Северного Ледовитого и Тихого океанов<br>(побережье Охотского моря, Центральный колымский район) |                          |                        |          |       |                             |               |          |                                                  |
| Дисперсные породы                                                                                          |                          |                        |          |       |                             |               |          |                                                  |
|                                                                                                            | Многолетнемерзлые породы |                        |          |       | Талые водонасыщенные породы |               |          |                                                  |
| Галечники                                                                                                  | 4250–650                 | 2600–2700              | 1.9–2.3  | -7–<0 | 1500–1600                   | 450–600       | 2.0–2.4  | (Седов, 1988,<br>1992)                           |
| Пески                                                                                                      | 4250–4550                | 2600–2700              | 1.9–2.4  | -7–<0 | 1500–1800                   | 350–500       | 2.0–2.4  |                                                  |
| Суглинки, глины                                                                                            | 3500–3800                | 1800–2100              | 1.7–2.0  | -7–<0 | 1600–1800                   | 400–550       | 1.8–2.1  |                                                  |
| Коренные породы (скальные и полускальные)                                                                  |                          |                        |          |       |                             |               |          |                                                  |
|                                                                                                            | Многолетнемерзлые породы |                        |          |       | Талые сухие                 |               |          |                                                  |
| Андезиты,<br>базальты,<br>граниты                                                                          | 4000–5500<br>5200–7000   | 3000–4100<br>3500–5000 | 2.7–2.9  | -7–<0 | 4000–5500<br>5200–7000      | 3000–<br>5000 | 2.7–2.9  | (Седов,<br>1988, 1992;<br>Миндель и<br>др. 2000) |
| Ультразвук*_<br>песчаник,<br>глинистые<br>сланцы                                                           | 4600–5100<br>5000–6000   | 3450–3500              | 2.65     | -7–<0 | 4600–5100<br>5000–6000      | –             | 2.65     |                                                  |
| Территория Северо-Восточной и Восточной Сибири и Байкальский регион                                        |                          |                        |          |       |                             |               |          |                                                  |
| Дисперсные грунты                                                                                          |                          |                        |          |       |                             |               |          |                                                  |
|                                                                                                            | Многолетнемерзлые породы |                        |          |       | Талые водонасыщенные породы |               |          |                                                  |
| Галечник, песок,<br>щебень                                                                                 | 3200–3900                | 1750–2200              | 1.9–2.0  | T<-2  | 1600–1900                   | 500–600       | 1.9–2.0  | (Джурик и<br>др., 2008,<br>2009, 2011)           |
| Супеси, пески                                                                                              | 3000–3700                | 1600–2000              | 2.0–2.1  | -1    | 1600–1700                   | 450–600       | 2.0–2.1  |                                                  |
| Суглинки, глины                                                                                            | 3200–4000                | 1700–2200              | 1.9–2.0  | T<-2  | –                           | –             | –        |                                                  |
|                                                                                                            | Многолетнемерзлые породы |                        |          |       | Талые сухие                 |               |          |                                                  |
| Галечниковый и<br>глыбовый грунт                                                                           | 3200–3900                | 1770–2200              | 2.0–2.1  | T<-2  | 900–1100                    | 450–550       | 2.0–2.1  | (Джурик и<br>др., 2008,<br>2009, 2011)           |
| Супеси, пески                                                                                              | 2500–2900                | 1300–1600              | 1.9–2.0  | T<-2  | 500–700                     | 270–350       | 1.9–2.0  |                                                  |
| Песчаные<br>породы с<br>гравием и<br>галькой                                                               | 2800–3000                | 1500–1600              | 2.0      | T<-2  | 700–900                     | 400–450       | 2.0      |                                                  |
| Суглинки, глины                                                                                            | –                        | –                      | –        | –     | 600–700                     | 300–350       | 1.8–1.9  |                                                  |

<sup>1</sup> Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Научно-технический отчет по теме: «Составление карты детального районирования Европейской части России и Урала для проектных и максимальных расчетных землетрясений и типовых наборов расчетных сейсмических воздействий для действующих, строящихся и проектируемых АЭС». Раздел «Сейсмическое микрорайонирование комплексом инструментальных геофизических и сейсмологических методов площадок АЭС». Книга 10. «Сейсмическое микрорайонирование площадки Билибинской АЭС». М.: ИГЭ РАН, 2013. 86 с.

<sup>2</sup> Сас И.Е., Багрянцев Д.М., Трифонов Б.А. Технический отчет по результатам выполнения актуализации инженерно-геологических изысканий на объекте: «Строительство ГОКа на месторождении «Железный кряж» Забайкальский край», М.: ООО «Терра Сервис», 2020. 301 с. (в отчете приведены результаты инструментальных исследований на объекте «Железный кряж», обобщенные «Сибирской геофизической службой (СГС)»)

Таблица 2. Окончание

Table 2. Continued

| Коренные породы (скальные и полускальные грунты)                                                 |                          |           |           |        |                             |           |          |                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------|-----------|--------|-----------------------------|-----------|----------|----------------------------------------|
|                                                                                                  | Многолетнемерзлые породы |           |           |        | Талые сухие                 |           |          |                                        |
| Трещиноватые и слабо трещиноватые породы                                                         | 3000–4200                | 1700–2400 | 2.5–2.6   | T<-2°C | 2500–3200                   | 1400–1800 | 2.5–2.6  | (Джурик и др., 2008, 2009, 2011)       |
| Сильно трещиноватые породы                                                                       | 2700–3000                | 1450–1600 | 2.5–2.6   | -1°C   | 2300–2700                   | 1200–1500 | 2.55     |                                        |
| Чукотка (Билибинская АЭС)                                                                        |                          |           |           |        |                             |           |          |                                        |
| Коренные породы (скальные и полускальные)                                                        |                          |           |           |        |                             |           |          |                                        |
|                                                                                                  | Многолетнемерзлые породы |           |           |        | Талые сухие                 |           |          |                                        |
| Слабо трещиноватые песчан., алеврол.,                                                            | 3500–3900                | 1900–2200 | 2.6–2.7   | -7–<0  | 2550–2750                   | 1450–1600 | 2.65     | (Миндель, Трифонов, 2013) <sup>1</sup> |
| Забайкалье (на границе с Монголией)                                                              |                          |           |           |        |                             |           |          |                                        |
| Дисперсные грунты                                                                                |                          |           |           |        |                             |           |          |                                        |
|                                                                                                  | Многолетнемерзлые породы |           |           |        | Талые водонасыщенные породы |           |          |                                        |
| Суглинок и глина слаболистые, твердомерзлые с гравием и галькой, при оттаивании мягко пластичные | 2300–2600                | 1150–1300 | 2.07–2.11 | T<-2°C | 1850–2000                   | 500–650   | 2.0–2.05 | (Сас и др., 2020) <sup>2</sup>         |
| Коренные породы (скальные и полускальные)                                                        |                          |           |           |        |                             |           |          |                                        |
|                                                                                                  | Многолетнемерзлые породы |           |           |        | Талые сухие                 |           |          |                                        |
| Алевролиты, песчаник средней прочности                                                           | 2950–3200                | 1550–1650 | 2.43–2.46 | T<-2°C | 2150–2750                   | 1100–1470 | 2.3–2.4  | (Сас и др., 2020) <sup>2</sup>         |

Примечание. \* — ультразвуковые исследования на образцах: в числителе значения скоростей вкост слоистости; в знаменателе значения скоростей вдоль слоистости.

Note: \* — ultrasonic samples test: in the numerator are velocity values in cross layering; in the denominator velocity values along the layering.

Миндель, Трифонов, 2013), при рассмотрении закономерностей изменения сейсмических характеристик на грунтах криолитозоны, авторами были составлены геосейсмические модели для типичных криогенных условий на дисперсных грунтах соответственно в воздушно-сухом (модели № 1, № 2) и мерзлом (модели № 3, № 4) состояниях и на скальных (модели № 5, № 6) грунтах для территории Билибинской АЭС, а также рассчитанная по ним сейсмическая опасность (табл. 3). Исследования для решения задач сейсмического микрорайонирования (СМР) территории Билибинской АЭС на Чукотке, в которых непосредственное участие принимали

авторы, проводились Институтом геоэкологии Российской академии наук (ИГЭ РАН) по заданию Института физики Земли в 2013 году. Вечномерзлые дисперсные грунты с температурой ниже  $-2^{\circ}\text{C}$  (модель № 4) характеризуются сравнительно высокими значениями скоростей упругих волн. В особенности это относится к крупнообломочным грунтам (аллювиальным, аллювиально-пролювиальным, моренным). Значения  $V_p$  и  $V_s$  у них близки к скоростям в скальных грунтах (модель № 1), отношения амплитуд максимальных акселерограмм  $A_i/A_{\text{ск}}$  не превышают 1.2–1.4 и по уровню (модель № 4) (табл. 3) сейсмической опасности они

# ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**Таблица 3.** Примеры некоторых типичных для криолитозоны геосейсмических моделей, обобщенных и построенных по результатам полевых исследований (Великин, 2020; Джурик и др., 2008, 2009, 2011; Миндель и др., 2000; Миндель, Трифонов, 2013<sup>1</sup>) и рассчитанная по ним сейсмическая опасность по программе NERA (Bardet, Tobita, 2001)

**Table 3.** Examples of some geoseismic models typical for cryolithozone, generalized and constructed according to field data (Velikin, 2020; Dzhurik et al., 2008, 2009, 2011; Mindel' et al., 2000; Mindel', Trifonov, 2013<sup>1</sup>) and seismic hazard calculated from them with NERA code (Bardet, Tobita, 2001)

| № модели                                                            | Тип грунта                                                                      | h, м              | Vp, м/с      | Vs, м/с      | $\rho$ ,<br>г/см <sup>3</sup> | $\Delta I$ , балл | $A_{\max}$ ,<br>см/с <sup>2</sup> |
|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Территория Северо-Восточной и Восточной Сибири и Байкальский регион |                                                                                 |                   |              |              |                               |                   |                                   |
| Твердомерзлые скальные, коренные породы (T < -7°C)                  |                                                                                 |                   |              |              |                               |                   |                                   |
| 1                                                                   | Коренные (эталонные) породы                                                     | 0–10<br>$\infty$  | 3000<br>4000 | 1600<br>2200 | 2.5<br>2.6                    | 0                 | 180–210                           |
| Воздушно-сухие грунты                                               |                                                                                 |                   |              |              |                               |                   |                                   |
| 2                                                                   | Песчаные и гравийно-галечные грунты (T > 0°C)                                   | 0–20<br>20–50     | 700<br>800   | 350<br>400   | 1.9<br>2.0                    | +1                | 370–400                           |
|                                                                     | Коренные породы (T < -7°C)                                                      | 50–60<br>$\infty$ | 3000<br>4000 | 1600<br>2200 | 2.5<br>2.6                    |                   |                                   |
| Мерзлые грунты с различной отрицательной температурой               |                                                                                 |                   |              |              |                               |                   |                                   |
| 3                                                                   | Гравелисто-щебенистые высокольдистые грунты (-2°C < T < -1°C)                   | 0–50<br>$\infty$  | 2800<br>4000 | 1500<br>2200 | 2.0<br>2.6                    | +0.5              | 350                               |
| 4                                                                   | Песчаные, гравийно-галечные сцементированные льдом грунты (T < -2°C)            | 0–50<br>$\infty$  | 3200<br>4000 | 1700<br>2200 | 2.0<br>2.6                    | 0                 | 250                               |
| Территория Чукотки р-н (Билибинской АЭС)                            |                                                                                 |                   |              |              |                               |                   |                                   |
| 5                                                                   | Многолетнемерзлые песчаники, алевролиты, аргиллиты (-7°C < T < 0°C)             | 0–4               | 900          | 490          | 2.10                          | -0.06–+0.08       | 9–10                              |
|                                                                     |                                                                                 | 4–34              | 3500         | 1950         | 2.65                          |                   |                                   |
|                                                                     |                                                                                 | 34–60             | 3900         | 2150         | 2.65                          |                   |                                   |
|                                                                     |                                                                                 | $\infty$          | 4100         | 2300         | 2.70                          |                   |                                   |
| 6                                                                   | Песчаники, алевролиты аргиллиты в чаше оттаивания через 25 лет после работы АЭС | 0–4               | 900          | 490          | 2.10                          | +0.28–+0.38       | 10–11                             |
|                                                                     |                                                                                 | 4–9               | 2000         | 1100         | 2.30                          |                   |                                   |
|                                                                     |                                                                                 | 9–34              | 2600         | 1500         | 2.65                          |                   |                                   |
|                                                                     |                                                                                 | 34–60             | 2750         | 1600         | 2.65                          |                   |                                   |
|                                                                     |                                                                                 | $\infty$          | 4100         | 2300         | 2.70                          |                   |                                   |

сопоставимы со скальными  $\Delta I \approx 0$  балл (модель № 1) принимаемой за эталонную при расчете  $\Delta I$ , балл по методу сейсмических жесткостей. Для мерзлых гравелистых и щебенистых грунтов при  $-2^{\circ}\text{C} < T < -1^{\circ}\text{C}$ , характерны несколько пониженные значения  $V_p$  и  $V_s$  и повышенные отношения  $A_v/A_{\text{ск}}$ , соответственно величина приращений сейсмической балльности ( $\Delta I$ ) близка к +0.5 балла (модель № 3). Для рыхлых грунтов с температурой выше  $0^{\circ}\text{C}$ , расчетные значения приращений балльности по отношению к скальным, коренным (эталонным) породам достигают +1 балла (модель № 2). Отсюда следует, что отношения максимальных амплитуд колебаний при землетрясениях на талых грунтах должны быть больше чем на мерзлых, но значительно меньше, чем на водонасыщенных, что проявляется в величинах  $A_{\max}$  акселерограмм. На обводненных грунтах в зонах протяженных таликов  $\Delta I$  может превышать 2 балла. Это объясняется не только высоким положением уровня грунтовых вод, но

и их морфологией с которой можно связывать многократные отражений сейсмических волн и явление резонанса. Были также рассчитанные по моделям № 1–№ 6 характеристики сейсмических воздействий ( $A_{\max}$ ).

При рассмотрении моделей хорошо видно, что при переходе из мерзлого состояния в талое, значения скоростей поперечных волн ( $V_s$ ) в дисперсных грунтах уменьшаются. В скальных породах эти изменения значительно меньше. При этом как в талых водонасыщенных, так и в талых сухих породах значения  $V_s$  имеют близкие значения. По значению акустической жесткости ММП, по сравнению с их талым состоянием, являются более жесткими средами. Для ММП акустическая контрастность литологических границ выше, чем для талых толщ. Отсюда высокая акустическая контрастность границ талик-мерзлота, как отмечал Б.М. Седов (1988). Среди талых грунтов повышенными значениями скоростей обладают обводненные грунты.

Наибольшие значения скоростей распространения продольных и поперечных волн  $V_p$  и  $V_s$  волн характерны для мерзлых скальных грунтов. Исследования показывают (Седов, 1988, 1992), что волновые поля в криолитозоне определяются не только скоростными характеристиками среды, но и распределением плотности и поглощающей способностью (у пластового льда значения аномально низкие).

На рисунках 4 и 5 приведены примеры результатов нашего расчета параметров сейсмических воздействий для грунтов разного литологического состава при разном их мерзлотном состоянии, выполненных с программой NERA (Bardet, Tobita, 2001). Показано, что поменялись максимальные значения акселерограмм ( $A_{\max}$ ) и форма кривых динамичности  $\beta(T)$ , притом что уровень  $\beta(T)$  изменился не значительно.

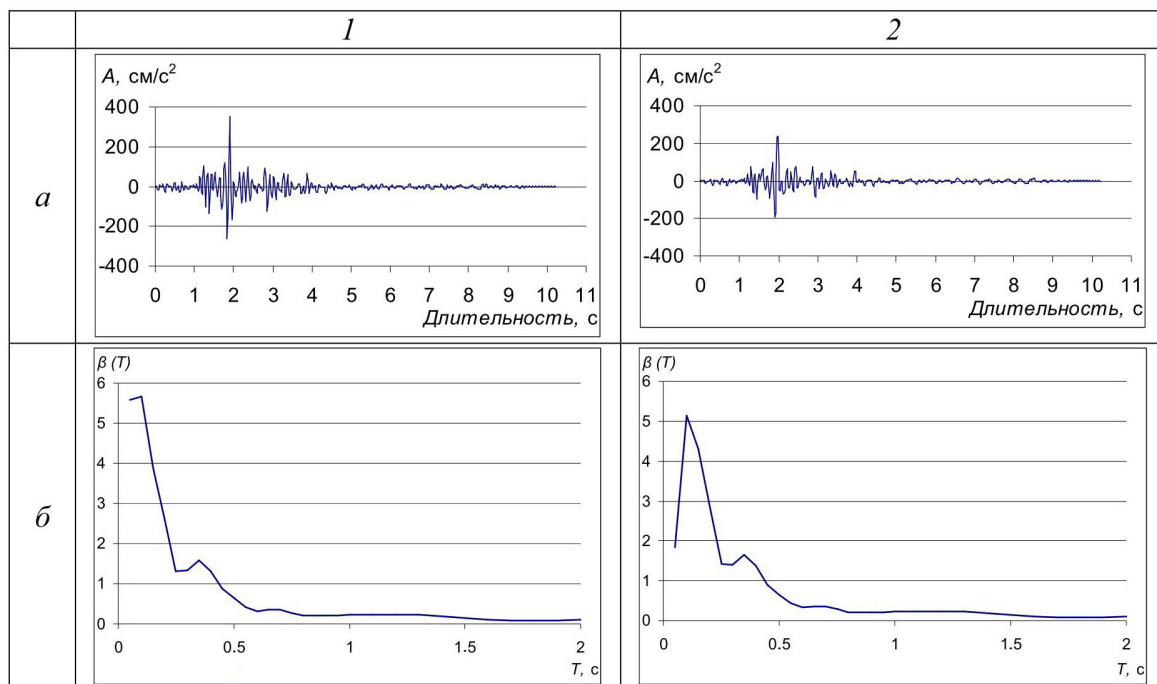
### ОБОСНОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА

В северных регионах России практически все площадки изысканий имеют сложные, неоднородные по простиранию и глубине мерзотно-грунтовые условия. Так, на одной строительной площадке в основании сооружений могут залегать как талые, так и мерзлые

грунты, пластичномерзлые и охлажденные, сильно льдистые, засоленные и т.д. В таких условиях практически невозможно обеспечить требования СП 25.13330.2012 (Свод правил, 2012) об использовании грунтов площадки (и даже отдельного сооружения) по единому принципу — в мерзлом (принцип I) или талом (принцип II) состоянии.

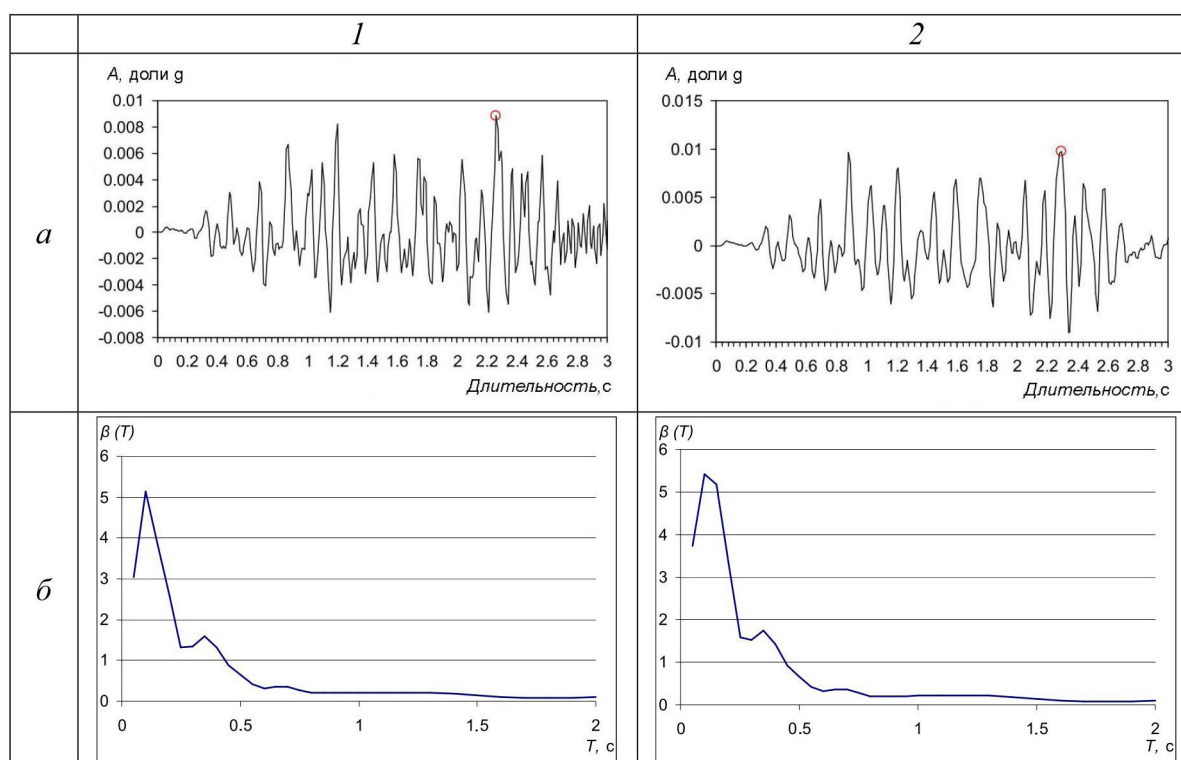
Сложность строения криолитозоны усугубляется и тем, что у грунтов одной литологии могут меняться сейсмические свойства во времени, в процессе деградации мерзлоты, что требует системного, продолжительного изучения состояния этих грунтов. Кроме того, исследования, проведенные Б.М. Седовым (1988, 1992) и в последние годы (Джурик и др., 2009, 2011, 2020) выявили влияние строения криолитозоны на распределение региональной сотрясаемости при землетрясениях.

При разработке методики сейсмического мониторинга и прогноза изменения сейсмических условий на грунтах криолитозоны требуется проведение учета и анализа результатов деградации мерзлоты вплоть до ее полного оттаивания в основаниях сооружений. В таких условиях, по нашему мнению, целесообразно рассматривать подход по оценке сейсмической опасности на основе использования расчетных



**Рис. 4.** Пример результатов расчета сейсмических воздействий (акселерограмм  $A$ ,  $\text{cm/s}^2$  (а) и кривых динамичности  $\beta(T)$  (б)) для песчаных и гравийно-галечных грунтов мощностью 50 м в 1 — воздушно-сухом (модель № 2, табл. 3) и 2 — мерзлом с отрицательной температурой  $T < -2^\circ\text{C}$  (модель № 4, табл. 3) состояниях. Исходная акселерограмма для расчета «Cholister», компонента X. 9.03.1949 USA.

**Fig. 4.** An example of the results of calculation of seismic effects (accelerograms  $A$ ,  $\text{cm/s}^2$  (a) and dynamical curves  $\beta(T)$  (b)) for sandy and gravel-pebble soils 50 m thick in 1 — air-dry (model № 2, tabl. 3) and 2 — frozen with negative temperature  $T < -2^\circ\text{C}$  (model № 4, tabl. 3) states. Initial accelerogram for the calculation of «Cholister», component X. 9.03.1949 USA.



**Рис. 5.** Результаты оценки сейсмических воздействий (акселерограмм в долях  $g$  (а) и кривых динамичности  $\beta$  (б)) в скальных грунтах многолетнемерзлых с  $V_s = 2050$  м/с (табл. 3, модель № 5) и в зоне оттаивания с  $V_s = 1450$  м/с под реакторным отделением Билибинской АЭС за 25 лет его работы (табл. 3, модель № 6).

**Fig. 5.** Results of seismic impact evaluation (accelerograms in fractions of  $g$  (a) and dynamics curves  $\beta$  (б)) in permafrost rock soils with  $V_s = 2050$  m/s (tabl. 3, model № 5) and in thawing zone with  $V_s = 1450$  m/s under reactor Bilibino NPP unit for 25 years of its operation (tabl. 3, model № 6).

методов сейсмического микрорайонирования. Актуальность изучения проблемы деградации вечной мерзлоты отражена в Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года<sup>3</sup>. Весной 2021 года законопроект о создании системы мониторинга многолетней мерзлоты в России на базе Росгидромета был представлен для общественного обсуждения. Систему планируется создать в два этапа: с 2022 по 2024 гг. планируют разработать методы и технологии мониторинга, а после 2024 г. приступить к непосредственному созданию, сообщили в пресс-службе Минприроды России<sup>4</sup>.

Известно, что разрушения, вызываемые землетрясениями, обусловлены ростом сейсмической нагрузки, которая может усугубляться неравномерной деформацией грунтов в основании зданий и сооружений (Алешин, 2010; Трифонов и др., 2021) и в силу неоднородности их мерзлотных свойств (Воронков, 2009; Седов, 1988, 1992). Характеристики грунтов не остаются постоянными,

а изменяются со временем на территории распространения ММП из-за сезонных колебаний температуры, антропогенного воздействия и в результате глобального изменения климата.

Работа (Мельников и др., 2022) посвящена обоснованию многоуровневого системного мониторинга геологической среды при решении задач геодинамической безопасности горнодобывающих, гидротехнических, нефтегазовых и сооружений ТЭК на мерзлоте, однако конкретные риски связанные с сейсмичностью, при этом, в них не обсуждаются. Накопленный опыт геофизического мониторинга предложенного в работе (Великин, 2020) может быть использован для проведения уточнения и прогнозирования сейсмической опасности применительно к зоне ММП России в сейсмоактивных районах. Мониторинг сейсмических свойств инженерно-геологического разреза в пределах криолитозоны приобретает особую значимость, как на стадии строительства, так и при дальнейшей эксплуатации инженерных сооружений. Результаты мониторинга позволят вносить коррективы в имеющиеся прогнозные оценки рисков связанных с изменением климата Арктической зоны России (Анисимов и др., 2022).

Прогноз интенсивности колебаний на свободной поверхности полупространства от

<sup>3</sup> Утверждена Указом Президента России от 26 октября 2020 г. № 645. URL: <http://docs.cntd.ru/document/566091182>, дата обращения: 30.03.2021

<sup>4</sup> <https://tass.ru/obschestvo/11310181>

землетрясений определяется правильностью выбора модели с учетом всех основных параметров разреза, влияющих на сейсмический эффект и точность его определения. Такие результаты расчетов по компьютерным программам сопоставимы с реальными записями при сильных землетрясениях (Павленко, 2009). Можно выделить некоторые принципы проведения мониторинга сейсмических условий при СМР на грунтах криолитозоны. Задача прогноза должна включать: изучение сейсмических свойств грунтов и создание региональных сейсмологических моделей криолитозоны, выявление влияния строения геокриологического разреза на региональную сейсмичность. Нами предлагается возможный подход к прогнозной оценке изменения сейсмических условий на грунтах криолитозоны (рис. 6).

Заключительной задачей мониторинга сейсмических свойств инженерно-геологического массива (геосейсмического мониторинга) в пределах криолитозоны должно является уточнение и прогнозирование сейсмической опасности в баллах и максимальных сейсми-

ческих воздействий в зависимости от состояния грунтов и их упругих свойств, а также в результате строительства и эксплуатации уже имеющихся сооружений на мерзлых грунтах. Как отмечалось, эта задача может быть решена расчетными методами СМР, если достаточно надежно спрогнозировать и учесть изменение упругих параметров для грунтов в новом их качестве (талик – ММП). Для этого строится схема основных морфологических особенностей изучаемой территории и результатов комплексных инженерно-сейсмологических наблюдений. Обязательным должен являться прогноз сейсмической опасности на случай частичной или полной деградации мерзлоты, что дает возможность при проектировании исходить из экономических соображений. Для предварительных расчетов сейсмической опасности грунтов различного состояния в баллах можно использовать зависимость приращений сейсмической балльности от скоростей сейсмических волн в верхней зоне разреза по формуле С.В. Медведева (1962) с учетом поправок за глубину залегания уровня грунтовых вод (УГВ) ( $h$ )



Рис. 6. Схема предлагаемой прогнозной оценки изменения сейсмических условий на грунтах криолитозоны.

Fig. 6. Scheme of the proposed predictive assessment of changes in seismic conditions for permafrost zone soils.

и температуру мерзлых грунтов взятой по модулю ( $T^{\circ}C$ ):

$$\Delta I = 1.67 \lg(\rho_y \cdot V_y / \rho_i \cdot V_i) + K \cdot e^{-0.04h^2} + K \cdot e^{-0.5T}$$

где  $\rho_y \cdot V_y$  и  $\rho_i \cdot V_i$  — сейсмические жесткости эталонного и исследуемого грунтов. При определении

$\Delta I_{\text{угв}} = K \cdot e^{-0.04h^2}$  — расчетные значения приращений балльности за УГВ,  $V_i$  значение скорости поперечных волн на песчано-глинистых грунтах III категории по сейсмическим свойствам (рыхлые, средней плотности пылеватые, мелкие, средние пески и все глинистые грунты от мягкопластичной до текучепластичной консистенций, залегающей ниже УГВ). Величина коэффициента  $K$  в этом случае не может быть более 0.6 (Трифонов и др., 2019). На плотных песках и глинистых грунтах от тугопластичной до твердой консистенций по методу сейсмических жесткостей  $\Delta I_{\text{угв}}$  можно не учитывать (Трифонов и др., 2019). Расчет сейсмических воздействий следует проводить по типичным для региона исследования сейсмогеокриологическим моделям, для которых большую роль играют изменения спектрального состава колебаний при землетрясениях, связанные с сезонными факторами.

Для мерзлого состояния дисперсных и скальных грунтов (в том числе трещиноватых, льдистых) максимальные ускорения должны прогнозироваться соответственно в интервале 150–400  $\text{см}/\text{с}^2$  (для горизонтальной компоненты), для прогнозируемого талого их состояния, эта величина может иметь значения соответственно равные 170–900  $\text{см}/\text{с}^2$ , например, в пределах крупных геологических структур северо-востока Байкальской сейсмической зоны (Джурик и др., 2009, 2011, 2020). Данные в обобщенном виде, полученные по динамическим параметрам сильных землетрясений для преобладающих разновидностей грунтовых комплексов, позволяют строить для решения задач СМР карты-схемы возможных максимальных ускорений на случай сильных прогнозируемых землетрясений: для стабильного состояния мерзлоты и при ее деградации. Таким образом, можно разделять территорию исследования на участки с разной балльностью в мерзлом и талом состояниях, оценивая возможность деградации мерзлоты. Возникает возможность составления варианта карты СМР для прогнозируемых криогенных условий.

Экспериментальные исследования на основе использования результатов режимных измерений сейсмических параметров мерзлых грунтов, выполненных на участках с различной степенью техногенного воздействия в различных регионах (климатических зонах) центральной Якутии (Великин, 2020), северо-восточной Сибири и Забайкалье (Джу-

рик и др., 2009, 2011, 2020; Седов, 1988, 1992), на Чукотке и в Магаданской области (Седов, 1988, 1992), на Таймыре (Миндель и др., 2000), а также на Чукотке (Миндель, Трифонов, 2013'), показывают возможность прогноза изменения скоростей упругих волн мерзлых грунтов при переходе их в талое неводонасыщенное или водонасыщенное состояния (и наоборот). Существующая связь сейсмических характеристик ММП со строением и свойствами криолитозоны дает возможность прогнозировать сейсмические воздействия при ее деградации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В связи с наблюдаемым глобальным потеплением и влиянием техногенных факторов на мерзлоту, особенно заметных в Арктических и Сибирских регионах нашей страны, необходимы дальнейшие исследования изменения сейсмических и механических свойств грунтов криолитозоны.

2. Такие исследования могут быть использованы для составления прогноза поведения грунтовых массивов в случае их сейсмогенных сотрясений.

3. Необходимо проведение геофизического мониторинга, включающего изучение сейсмических свойств грунтов криолитозоны с составлением региональных моделей изучаемых территорий в условиях изменения климата.

4. Приведенные в статье данные можно использовать при решении геофизических задач, сейсмического микрорайонирования и расчета сейсмических воздействий для прогнозируемых сильных землетрясений с учетом региональных мерзлотных особенностей. Для этого необходимо создание и экспериментальное обеспечение инженерно-сейсмологических полигонов в промышленных районах на участках распространения мерзлых грунтов с учетом регионального проявления динамики сейсмических воздействий с возможностью их моделирования.

Авторы выражают благодарность рецензентам за их замечания и пожелания.

## Список литературы [References]

- Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. Москва: Светоч Плюс, 2010. 304 с. [Aleshin A.S. Sejsmicheskoe mikrorajonirovanie osobo otvetstvennyh obyektov. Moskva: Svetoch Plus, 2010. 304 p. (in Russian)].
- Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А. и др. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Глава 8. Континентальная многолетняя мерзлота. М.: Росгидромет, 2012. С. 301–359 [Anisimov O.A.,

- Anokhin Yu.A., Lavrov S.A. et al.* Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems. Chapter 8 Continental permafrost. Moscow: Roshydromet, 2012. P. 301–359 (in Russian)].
- Анисимов О., Бадина С., Белолуцкая М. и др.* Изменение климата в Российской Арктике: риски и новые возможности. ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. Москва, 2022. 105 с. [Anisimov O., Badina S., Belolutskaia M. et al. Climate change in the Russian Arctic: risks and new opportunities. Assessment report. «State Hydrological Institute», Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO. Moscow, 2022. 105 p. (in Russian)].
- Анисимов О.А., Белолуцкая М.А., Григорьев М.Н. и др.* Оценочный отчет. Основные природные и социально-экономические последствия изменения климата в районах распространения многолетнемерзлых пород: прогноз на основе синтеза наблюдений и моделирования. М.: ОМННО Гринпис России, 2010. 44 с. [Anisimov O.A., Belolutskaia M.A., Grigoriev M.N. et al. Assessment Report. The Major Natural and Social-Economic Consequences of Climate Change in Permafrost Region: a Forecast Based upon a Synthesis of Observations and Modeling. Assessment Report. Moscow: OMNNO Greenpeace, 2010. 44 p. (in Russian)].
- Великин С.А.* Комплексное геофизическое изучение инженерно-геокриологического состояния оснований гидро- и горнотехнических сооружений Якутской алмазной провинции. Автореф. дисс. докт. тех. наук. Якутск, 2020. 43 с. [Velikin S.A. Complex geophysical study of the engineering and geocryological state of the foundations of hydro- and mining structures of the Yakut diamond province. Autoref. diss. Doctor of Technical Sciences. Yakutsk, 2020. 43 p. (in Russian)].
- Вознесенский Е.А.* Динамическая неустойчивость грунтов. Москва: Эдиториал УРСС, 1999. 263 с. [Voznesensky E.A. Dinamicheskaya neustojchivost' gruntov. Moskva: Editorial URSS, 1999. 263 p. (in Russian)].
- Воронков О.К.* Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). Санкт-Петербург: изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. 401 с. [Voronkov O.K. Inzhenernaya sejsmika v kriolitozone (izuchenie stroeniya i svojstv merzlyh i talyh gornyh porod i massivov). Sankt-Peterburg: Publishing house of JSC «Vedeneev VNIIG», 2009. 401 p. (in Russian)].
- Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М.* Сейсмические методы в инженерной геологии. Москва: Недра, 1979. 143 с. [Goryainov N.N., Lyakhovitsky F.M. Sejsmicheskie metody v inzhenernoj geologii. Moscow: Nedra, 1979. 143 p. (in Russian)].
- Дещеревская Е.В., Павленко О.В.* Частотно-зависимый отклик мягких (песчаных и лессовых) грунтов на сейсмические воздействия и метод сейсмических жесткостей (МСЖ) // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. № 1. С. 53–62. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2020-1-53-62> [Deshcherevskaya E.V., Pavlenko O.V. Frequency-dependent Response of Soft (Sandy and Loess) Soils in Seismic Motion and Seismic Rigidity Method // Earthquake engineering. Constructions safety. 2020. № 1. P. 53–62 (in Russian)].
- Джурик В.И., Брыжак Е.В., Серебренников С.П. и др.* Динамика спектрального состава колебаний приповерхностного слоя годовых вариаций температур при землетрясениях в Байкальском регионе // Геология и геофизика. 2020. № 8. С. 1136–1146. <https://doi.org/10.15372/GiG2019123> [Dzhurik V.I., Bryzhak E.V., Serebrennikov S.P. et al. The Spectral Behavior of Ground Coseismic Motion in the Baikal Region: Effect of Seasonal Thawing-Freezing Cycles // Russian Geology and Geophysics. 2020. V. 61. № 8. P. 929–936. <https://doi.org/10.15372/RGG2019123>].
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф. и др.* Районирование сейсмической опасности протяженных трасс линейных сооружений в Сибирском регионе // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 4. С. 53–59 [Dzhurik V.I., Serebrennikov S.P., Drennov A.F. et al. Experience of seismic hazard zoning along extended line structures in the Siberian region // Seismic Instruments. 2009. V. 36. № 4. P. 53–59 (in Russian)].
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Ескин А.Ю. и др.* Инженерно-сейсмологическое обеспечение безопасности строительства линейных сооружений в сейсмоактивных районах Южной Якутии с учетом деградации мерзлоты // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2011. Т. 4. № 1. С. 60–78 [Dzhurik V.I., Serebrennikov S.P., Eskin A.Yu. et al. Earthquake engineering safety of laying in seismoactive areas of South Yakutia with regard to permafrost degradation // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle». 2011. V. 4. № 1. P. 60–78 (in Russian)].
- Джурик В.И., Серебренников С.П., Дреннов А.Ф. и др.* Методика районирования параметров сейсмической опасности линейных сооружений по сейсмогрунтовым моделям // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 4. С. 66–76 [Dzhurik V.I., Serebrennikov S.P., Drennov A.F. et al. Methods of classification of parameters of seismic hazard of linear structures by seismic ground models // Earth's Cryosphere. V. 12. № 4. С. 66–76 (in Russian)].
- Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Романовский В.В. и др.* Цифровые карты криолитозоны и оценка современных изменений в криосфере // Холод'ОК 2018. № 1(16). С. 6–12 [Drozdov D.S., Malkova G.V., Romanovsky V.V. et al. Cifrovye karty kriolitozony i ocenka sovremennyh izmeneniy v kriosfere // Holod'OK 2018. № 1(16). P. 6–12].
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Смекалин О.П. и др.* Карта сейсмотектоники Восточной Сибири // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 3. С. 275–287. <https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-3-0182> [Imaev V.S., Imaeva L.P., Smekalin O.P. et al. // A seismotectonic map of Eastern Siberia // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6. Iss. 3. P. 275–287 (in Russian)].
- Козьмин Б.М.* Сейсмические пояса Якутии и механизмы очагов их землетрясений. Москва: Наука, 1984. 126 с. [Kozmin B.M. Seismic belts of Yakutia and mechanisms of their earthquake foci. Moscow: Nauka, 1984. 126 p. (in Russian)].
- Козьмин Б.М., Имаев В.С., Имаева Л.П.* Сейсмичность и современная геодинамика // Тектоника, геоди-

- намика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 33–68 [Kozmin B.M., Imaev V.S., Imaeva L.P. Seismicity and modern geodynamics // Tectonics, geodynamics and metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). Moscow: MAIK «Nauka/Interperiodica», 2001. P. 33–68 (in Russian)].
- Кочетков В.М., Козьмин Б.М. Оймяконское землетрясение 1971 г. и его афтершоки / Сейсмичность и глубинное строение Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 61–67 [Kochetkov V.M., Kozmin B.M. Ojmyakonskoe zemletryasenie 1971 g. i ego aftershoki / Seismichnost' i glubinnoe stroenie Sibiri i Dal'nego Vostoka. Vladivostok: SahKNII DVNC AN SSSR, 1976. P. 61–67 (in Russian)].
- Медведев С.В. Инженерная сейсмология. Москва: Госстройиздат, 1962. 284 с. [Medvedev S.V. Inzhenernaya sejsmologiya. Moscow: Gosstroizdat, 1962. 284 p. (in Russian)].
- Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли. 2022. Т. 26. № 4. С. 3–18. <https://doi.org/10.15372/KZ20220401> [Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al. Development of geocryological monitoring of natural and technical facilities in the regions of the Russian Federation based on geotechnical monitoring systems of fuel and energy sector // Earth's Cryosphere. 2022. V. 26. № 4. P. 3–18 (in Russian)].
- Миндель И.Г., Мешков М.М., Трифонов Б.А. Применение геофизических методов для выбора места размещения подземного нефтяного хранилища на Таймыре // Промышленное и гражданское строительство. 2000. № 8. С. 33–35 [Mindel I.G., Meshkov M.M., Trifonov B.A. Use of geophysical methods for selecting the place for location of underground petroleum storage facility at Taimyr // Industrial and Civil Engineering. 2000. №8. P. 33–35 (in Russian)].
- Национальный атлас России. Т. 2. Вечная мерзлота. 2004–2008. С. 240–242 (<https://nationalatlas.ru/tom2/240-242.html>) [National Atlas of Russia V. 2. Permafrost. 2004–2008. P. 240–242 (<https://nationalatlas.ru/tom2/240-242.html>) (in Russian)].
- Основы геокриологии. Ч. 5. Инженерная геокриология / Под ред. Ершова Э.Д. Москва: Изд-во МТУ, 1999. 526 с. [Osnovy geokriologii. Pt. 5. Inzhenernaya geokriologiya / Ed. by Ershov E.D. Moscow: MTU Publishing House, 1999. 526 p. (in Russian)].
- Павленко О.В. Современные методы оценки локальных эффектов землетрясений // Физика Земли. 2020. № 5. С. 59–69. <https://doi.org/10.31857/S0002333720040067> [Pavlenko O.V. Modern Methods for Estimating Local Effects of the Earthquakes // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2020. V. 56. № 5. P. 656–664. <https://doi.org/10.1134/S1069351320040060>].
- Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет. Научный мир, Москва, 2009. 258 с. [Pavlenko O.V. Seismic waves in soil layers: nonlinear soil behavior in recent strong earthquakes Nauchnyj mir, Moscow, 2009. 258 p. (in Russian)].
- Петров А.Ф., Козьмин Б.М., Шибяев С.В. и др. Уточненная карта сейсмического районирования территории Республики Саха (Якутия) // Материалы Международной конференции «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности» // Нерюнгри: Изд-во Технического института СВФУ, 2015. С. 215–222. <https://doi.org/10.18411/svfu1230915-29> [Petrov A.F., Kozmin B.M., Shibaev S.V. et al. Improved seismic zoning map of the Sakha Republic (Yakutia) territory // Proceedings of International Conference «Geological and geophysical environment and the various manifestations of seismicity». Neryungri: Publishing House of the NEFU Technical Institute 2015. P. 215–222 (in Russian)].
- Роман Л.Т., Царанов М.Н., Котов П.И. и др., Пособие по определению физико-механических свойств промерзающих, мерзлых и оттаивающих дисперсных грунтов. Москва: КДУ. Университетская книга, 2018. 188 с. [Roman L.T., Tsarapov M.N., Kotov P.I. et al., Posobie po opredeleniyu fiziko-mekhanicheskikh svojstv promerzayushchih, merzlyh i ottaivayushchih dispersnyh gruntov. KDU, Moscow: Universitetskaya kniga, 2018. 188 p. (in Russian)].
- Руководство по учету сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2016. 283 с. [Guidelines for accounting for seismic impacts in the design of hydraulic structures. Moscow: Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, 2016. 283 p. (in Russian)].
- Свод правил СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Дата актуализации: 01.01.2021. Москва, 2012. 118с. [Summary of rules SP 25.13330.2012 Soil bases and foundations on permafrost soils. M.: Date of update: 01.01.2021. Moscow, 2012. 118 p. (in Russian)].
- Седов Б.М. Сейсмические свойства криолитозоны. Автореф. дисс. докт. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург, 1992. 54 с. [Sedov B.M. Seismicheskie svojstva kriolitozony. Avtoref. diss. dokt. geol.-min. nauk. Sankt-Peterburg, 1992. 54 p. (in Russian)].
- Седов Б.М. Сейсмические исследования в районах многолетней мерзлоты. Москва: Наука, 1988. 184 с. [Sedov B.M. Seismicheskie issledovaniya v rajonah mnogoletnej merzloty. Moscow: Nauka, 1988. 184 p. (in Russian)].
- Семенова Ю.Д. Моделирование реакции грунтов при сейсмическом микрорайонировании строительных участков // Геофизический журнал. 2015. Т. 37. № 6. С. 137–153. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i6.2015.111181> [Semenova Yu.D. Modeling of soil reaction for seismic microzoning of building sites // Geophysical journal. 2015. V. 37. № 6. P. 137–153 (in Russian)].
- Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Несынов В.В. Оценка изменения сейсмических условий на урбанизированных территориях с использованием расчетных методов при решении задач сейсмического мониторинга // Инженерные изыскания. 2021. Т. 15.

- № 3–4. С. 54–68. <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2021-15-3-4-54-68> [Trifonov B.A., Sevostyanov V.V., Nesinov V.V. Assessment of seismic condition change in urbanized areas using calculation methods for seismic monitoring // Engineering survey. 2021. V. 15. № 3–4. P. 54–68 (in Russian)].
- Трифонов Б.А., Севостьянов В.В., Милановский С.Ю. и др. Оценка сейсмических свойств водонасыщенных дисперсных грунтов при решении задач сейсмического микрорайонирования // Геоэкология. 2019. № 5. С. 74–81. <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019574-81> [Trifonov B.A., Sevostyanov V.V., Milanovsky S.Yu. et al. Evaluation of seismic properties of water-saturated soils for solving problems in seismic microzoning // Geoekologiya. 2019. № 5. P. 74–81 (in Russian)].
- Уломов В.И. Сравнение карт ОСП–97 с их компиляцией — ОСП–2015. 2016. 6 с. ([http://seismos-u.ifz.ru/personal/documents/ОСП-97\\_ОСП-2015.pdf](http://seismos-u.ifz.ru/personal/documents/ОСП-97_ОСП-2015.pdf)) [Ulovov V.I. Sravnenie kart OSR-97 s ih kompilyaciej - OSR-2015. 2016. 6 p. (in Russian)].
- Харитонов В.А. Сейсмостойкое строительство на вечномёрзлых грунтах. Ленинград: Стройиздат, 1980. 79 с. [Kharitonov V.A. Seismostojkoe stroitel'stvo na vechnomerzlyh gruntah. Stroyizdat, Leningrad: Stroyizdat, 1980. 79 p. (in Russian)].
- Хрусталева Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне: Учебник. Москва: Изд-во МГУ, 2005. 541 с. [Khrustaleva L.N. Osnovy geotekhniki v kriolitozone: Textbook. Moscow: State University Press, 2005. 541 p. (in Russian)].
- Bardet J.P., Tobita T. NERA: a computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. Los Angeles, California, USA: University of Southern California, 2001. 44 p.
- Burn C.R. The thermal regime of cryosols // Cryosols (Permafrost-Affected Soils) / J. Kimble (Ed). Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag. 2004. P. 391–414.
- Grebenets V.I., Tolmanov V.A., Streletskiy D.A. Active layer dynamics near Norilsk, Taimyr peninsula, Russia // Geography, environment, sustainability. 2021. V. 14. № 4. P. 55–66. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-073>.
- Imaeva L.P., Imaev V.S., Kozmin B.M. Dynamics of the Zones of Strong Earthquake Epicenters in the Arctic-Asian Seismic Belt // Geosciences. 2019. V. 9. № 4:168. P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040168>.
- Konishchev V.N. Climate warming and permafrost. // Geography, environment, sustainability. 2009. V. 01. № 02. P. 4–19.
- Parazoo Nicholas C., Charles D. Koven et al. Detecting the permafrost carbon feedback: talik formation and increased cold-season respiration as precursors to sink-to-source transitions // The Cryosphere. 2018. V. 12. № 1. P. 123–144. <https://doi.org/10.5194/tc-12-123-2018>.
- Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G. et al. Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2010. V. 21. Iss. 2. P. 136–155. <https://doi.org/10.1002/ppp.683>.
- Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters. V. 14. № 2. 2019. № 025003. P. 1 (<http://seismos-u.ifz.ru15>. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf5e6>).

## ESTIMATION OF SEISMIC IMPACTS UNDER CONDITIONS OF PERMAFROST DEGRADATION

B.A. Trifonov<sup>1</sup>, S.Yu. Milanovsky<sup>1,2</sup>, V.V. Nesinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 101000

<sup>2</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia 123242

Received August 13, 2022; revised November 03, 2022; accepted December 26, 2022

Permafrost is widespread in Russia in many mining and oil regions. Some of these areas are located in zones of high seismic activity. In connection with global climate change and possible degradation of permafrost, it is necessary to study the seismic properties of frozen and thawed soils in northern regions, as well as the processes affecting their change. The solution of these problems requires an assessment of the influence of natural factors on the spectral composition and dynamic range of seismic vibrations in the upper layers of the section during earthquakes. The influence of short-term (seasonal thawing-freezing of active layer) factors and long-term (temperature trends) factors on seismic vibrations can be used for predicting changes in seismic conditions in seismically active regions. We present generalization of soils seismic properties and their reflection in the field of elastic wave velocities and oscillation amplitudes. A number of seismo-geocryological models, which can be used for solving engineering-geocryological problems in seismology, are considered. The importance of monitoring the seismic properties of soils during permafrost degradation is emphasized. An approach for estimating seismic hazard based on computational methods of seismic microzoning is proposed.

**Keywords:** permafrost, seismic properties of frozen and thawed soils, monitoring.