

## ДИНАМИКА СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА КОЛЕБАНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ ТЕМПЕРАТУР ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

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

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

Уровень достоверности решения задач фундаментальной и прикладной сейсмологии требует выявления степени влияния природных факторов на спектральный состав колебаний верхних грунтовых слоев при землетрясениях. В работе для решения поставленной задачи использовались необходимые данные по геологии, очаговой сейсмологии, сейсмогеологии и районирования сейсмической опасности территории Восточной Сибири.

Байкальский регион расположен в пределах Восточной Сибири, которая входит в умеренный и холодный климатические пояса, а также в области резко-континентального климата с высокой сейсмической активностью. Среднегодовая температура может опускаться ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . В этом отношении немаловажную роль играют данные годовых вариаций спектрального состава колебаний при землетрясениях в различных сейсмоклиматических зонах региона.

В статье рассмотрены динамические параметры сейсмических сигналов и установлены диапазоны их колебаний, связанные с влиянием сезонных факторов (оттаивание—промерзание). Основой при решении поставленных задач являлись рассчитанные спектры отобранных землетрясений, регистрация которых велась цифровыми сейсмостанциями, имеющими столбовидные амплитудно-частотные характеристики в диапазоне  $0.5\text{—}20.0$  Гц с шагом дискретизации  $\Delta = 0.01$  с.

Для проведения спектрального анализа отобрано трехкомпонентных записей более 200 землетрясений, зарегистрированных за последние 20 лет сетью сейсмических станций региона. Магнитуда выбранных землетрясений меняется от 2.8 до 7.5, энергетический класс от 9 до 14 и эпицентральные расстояния от 32 до 280 км.

Особенности влияния сезонных факторов на спектры отобранных землетрясений и частотную характеристику колебаний верхней зоны разреза детально рассмотрены для двух сейсмостанций с контрастными мерзлотными условиями. Далее в обобщенном виде они дополнены результатами аналогичных исследований для сейсмостанций, расположенных в различных мерзлотных условиях Байкальского региона. В результате выявлено, что на всем рассматриваемом диапазоне частот (до 20 Гц) наиболее существенно они проявляются на частотах выше  $5\text{—}6$  Гц и зависят от грунтовых особенностей оснований, на которых установлены сейсмоприемники. Кривые оттаивания или сравнимы по уровню их показаний с кривыми промерзания, или чаще всего выше, даже для не слишком контрастных по сейсмическим свойствам грунтов, служащих основаниями регистрирующей аппаратуры.

В результате основная выявленная закономерность динамики спектрального состава годовых колебаний верхних грунтовых слоев при землетрясениях связана с относительным уровнем увеличения или уменьшения интенсивности сейсмических колебаний, которые коррелируются с периодическими годовыми колебаниями температур. Полученные данные необходимы при решении геофизических задач, районирования сейсмической опасности и расчета сейсмических воздействий для прогнозируемых сильных землетрясений с учетом мерзлотных особенностей региона.

*Сейсмоклиматические зоны, землетрясения, динамика, спектры, частотные характеристики, среднегодовая температура, Байкальский регион.*

## THE SPECTRAL BEHAVIOR OF GROUND COSEISMIC MOTION IN THE BAIKAL REGION: EFFECT OF SEASONAL THAWING-FREEZING CYCLES

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

Reliable solution of theoretical and applied seismological problems requires the knowledge of natural factors that influence ground motion induced by earthquakes. The effect of seasonal freezing and thawing on the behavior of coseismic ground motion in the Baikal region has been studied using data on local geology, earthquake source parameters, seismogeology, and seismic risk zoning for East Siberia. East Siberia, including the highly seismic Baikal region, is located in a temperate and cold, sharply continental climate, with the mean annual air temperature locally falling below  $-10^{\circ}\text{C}$ . In this respect, the knowledge of seasonal variations in the ground motion spectra in different seismic-climatic zones of the region is of special importance.

We study the dynamic parameters of seismic signals and their variations caused by seasonal thawing and freezing of the ground, using calculated spectra of selected earthquakes that were recorded by  $0.5\text{—}20$  Hz digital seismic stations at a sampling interval ( $\Delta$ ) of  $0.01$  s.

Spectral analysis was applied to three-component records of more than two hundred  $M = 2.8$  ( $K = 9-14$ ) earthquakes that occurred in the region for the past twenty years at distances from 32 to 280 km from the stations.

The influence of seasonal temperature variations on the frequency responses of coseismic ground motion is discussed for the case of two seismic stations in zones of continuous and sporadic permafrost. The results are complemented by generalized data from other seismic stations located in different permafrost conditions within the Baikal region. The effect of seasonal freezing and thawing turns out to be the most prominent at frequencies above 5–6 Hz and depend on the properties and thermal state of soils beneath the stations. At the same time, they are more prominent in thawing than in freezing curves for any soil, including relatively solid bedrock.

The spectral behavior of earthquake-induced ground motion is associated with variations in wave amplitudes, which correlate with seasonal temperature variations. The reported results have implications for geophysical prospecting, seismic-risk zoning, and prediction of shaking intensity of large earthquakes, which require due regard for local permafrost conditions.

*Seismic climatic zones, earthquakes, ground motion, amplitude, frequency, spectra, permafrost, mean annual temperature, Baikal region*

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Байкальский регион включает в себя три субъекта РФ, объединяемых принадлежностью к бассейну оз. Байкал. Сегодня это Иркутская область, Республика Бурятия, Забайкальский край (рис. 1). Регион входит в умеренный климатический пояс, в область резко-континентального климата [Геокриологическая карта..., 1996]. Большая часть территории расположена в пределах криолитозоны в субарктическом климатическом поясе [Карта..., 1984]. Сейсмическая активность районов от 6 до 10 баллов [ОСР-2015].

Решение задач фундаментальной и прикладной сейсмологии требует выявления степени влияния природных факторов на спектральный состав верхних грунтовых слоев при землетрясениях. Наиболее значимые из них те, которые связаны с использованием данных записей землетрясений, зарегистрированных сетью постоянных сейсмических станций, расположенных в различных грунтовых и мерзлотных условиях. К ним можно отнести внесение различных поправок при обработке первичных записей землетрясений, районирование сейсмической опасности территорий и расчет сейсмических воздействий для прогнозируемых сильных землетрясений в регионе. В этом отношении в большей степени используются динамические характеристики сейсмических волн: амплитудные и фазовые спектры, частоты [Оценка..., 1988]. Необходимость учета влияния сезонных чередований температур на направленность изменения спектрального и амплитудного состава колебаний инженерных сооружений при землетрясениях в криолитозоне отмечалась и ранее [Джурик и др., 2000; Li et al., 2015]. В последнее время получены результаты [Briggs et al., 2017; Gupta, Trifunac, 2018], которые характеризуют особенность поведения слоев мерзлоты при сильных землетрясениях и обосновывают необходимость прогноза их поведения при температурных изменениях. Последние могут быть связаны с годовыми колебаниями температур, уровнем техногенеза в регионе и изменением климата.

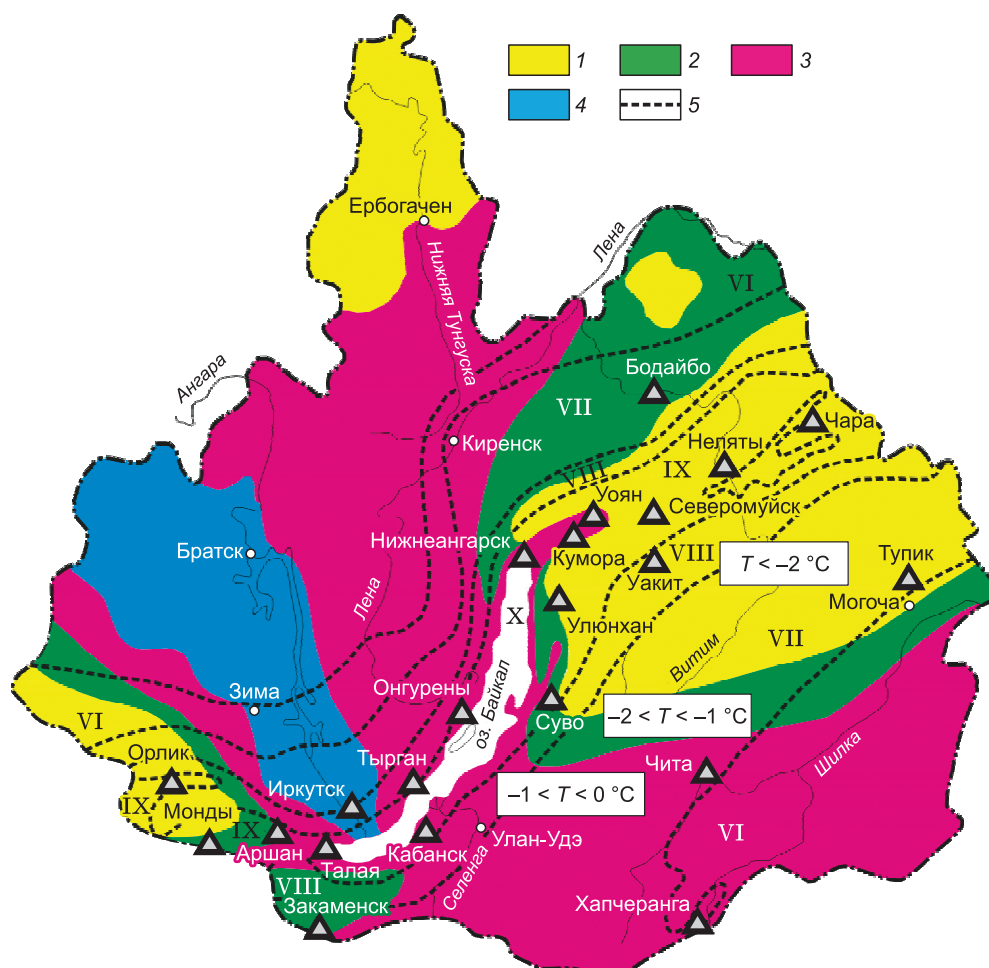
Наши исследования направлены на выявление и учет изменения основных сейсмических характеристик и их параметров (амплитуды, частоты), связанных с годовыми вариациями, оттаиванием и промерзанием грунтов, которые могут вносить определенные искажения в решение отмеченных выше задач. В особенности это касается самой верхней динамичной зоны разреза, связанной с годовыми колебаниями температур в различных сейсмоклиматических зонах Байкальского региона.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Анализ спектрального состава зарегистрированных землетрясений за указанный выше период выполнен на различном уровне исследований для 24 пунктов их регистрации (см. рис. 1). Наиболее детальный объем работ в методическом отношении проведен для двух сейсмических станций, расположенных в относительно контрастных мерзлотных зонах: зоне сплошного распространения мерзлых грунтов — «Орлик» и островного распространения вечномерзлых грунтов (редкие острова и линзы мерзлых грунтов) — «Нижнеангарск».

Сейсмостанция «Орлик» расположена в Окинском районе (Республика Бурятия) на высоте 1376 м над ур. м. в Восточных Саянах в узкой межгорной долине на правом берегу р. Ока, выше впадения в нее реч. Орлик (см. рис. 1). Климат здесь резко-континентальный с продолжительной и суровой зимой, безветренной и малоснежной. Лето короткое и теплое. Среднегодовая температура  $-4.8$  °С, в течение года по среднемесячным значениям она меняется от  $-22.6$  °С (январь) до  $+12.6$  °С (июль). В районе пос. Орлик встречаются ледники, вулканы и горячие источники [Большая..., 2006].

Сейсмостанция «Нижнеангарск» расположена на северном берегу Байкала, в поселке городского типа Нижнеангарск, в 23 км к северо-востоку от г. Северобайкальск, на юго-западе поселка, вблизи устья руч. Сырой Молокон, впадающего в оз. Байкал. Климат в горах резко-континентальный, на по-



**Рис. 1. Совмещенная карта-схема мерзлотного и сейсмического районирования Байкальского региона.**

1 — районы сплошного распространения вечномёрзлых грунтов; 2 — с крупными массивами мерзлых пород; 3 — островного распространения вечномёрзлых грунтов (редкие острова и линзы мерзлых грунтов); 4 — вечномёрзлые грунты отсутствуют; 5 — границы сейсмических зон. Римские цифры — интенсивность землетрясения в баллах. Треугольниками обозначены сейсмостанции.

бережье Байкала — более мягкий, абсолютная высота 475 м. Средняя температура воздуха в январе  $-23^{\circ}\text{C}$ , в июле  $+15^{\circ}\text{C}$ , среднегодовая  $-3.2^{\circ}\text{C}$  [Геология..., 1985]. В районе развита островная мерзлота, но сама станция находится в районе таликов с глубоким сезонным промерзанием грунтов. Непосредственно в районе расположения станции возможны перелетки вечной мерзлоты [Некрасов, Климовский 1978].

Для станции Орлик температура на глубине нулевых годовых амплитуд примерно соответствует средней годовой температуре на кровле вечной мерзлоты. Выше глубины нулевых годовых амплитуд мерзлота подвержена воздействию сезонных изменений температуры. На любом месте из-за разнообразия рельефа снежного покрова и растительности средняя годовая температура грунта до глубины порядка 15 м может отличаться на  $2^{\circ}\text{C}$  [Уошборн, 1988]. Для выбранных станций именно эта часть мерзлоты и слоя сезонного оттаивания и промерзания определяет годовые колебания частотного и амплитудного состава при землетрясениях.

Для отобранных сейсмостанций использовали ежегодные записи землетрясений, зарегистрированные на каждой сейсмической станции в периоды оттаивания и промерзания. Ясно, что для всей рассматриваемой территории они могут различаться. Нами для анализа выбраны записи землетрясений в периоды оттаивания, когда среднемесячная температура была положительной и промерзания, когда отрицательной. Для сейсмостанций сами периоды совпадают: в первом случае это 5 мес. (май — сентябрь), во втором 7 мес. (октябрь — апрель), но они могут и различаться по величине средних месячных значений отрицательных и положительных температур [Большая..., 2006].

Выбор указанных выше станций базировался на том, что основаниями для регистрирующей аппаратуры служили грунты, сравнимые по составу, но различные по состоянию. В рассматриваемых случаях в слое годовых колебаний температур они представлены сверху глыбами, валунами, щебнем и трещиноватыми коренными породами. Ниже залегают относительно сохранные коренные породы (доломитовые известняки и гранитоиды, соответственно) со скоростями сейсмических волн, близкими к  $v_p = 3800$  м/с и  $v_s = 1950$  м/с (таблица).

Для решения поставленных задач были выбраны землетрясения, зарегистрированные в течение последних 20 лет сетью сейсмических станций Байкальского филиала ГС СО РАН. В число записей вошли землетрясения с магнитудой  $> 2.8$ , энергетическим классом  $> 9$  и эпицентральным расстоянием до 300 км. Последнее зависело от магнитуды зарегистрированных землетрясений. Для сейсмостанции Орлик использовали 41 такое землетрясение и для сейсмостанции Нижнеангарск — 36 землетрясений, регистрация которых велась цифровыми сейсмостанциями, имеющими столообразные амплитудно-частотные характеристики в диапазоне 0.5—20.0 Гц (за последние годы этот диапазон несколько расширен), с шагом дискретизации  $\Delta = 0.01$  с. Общее количество обработанных записей ускорений равно 77.

Основным показателем, описывающим влияние на спектральный состав зарегистрированных землетрясений, выбраны амплитудно-частотные характеристики колебаний верхних грунтовых слоев, подверженных изменению их физического состояния в периоды годовых циклов промерзания и оттаивания.

Частотные характеристики рассчитывались при использовании двух способов: спектрального отношения  $H/V$ , опирающегося на записи землетрясения на одной сейсмической станции [Nakamura, 1989], и расчетного с помощью метода тонкослоистых сред, основанного на построении скоростных сейсмических моделей верхней зоны разреза [Расчетные методы..., 1988].

Для реализации первого способа для выбранных землетрясений рассчитывались спектры [Дженкинс, Батте, 1972; Джурик и др., 2018], в итоге были использованы записи ускорений движения грунта при землетрясениях, зарегистрированных каждой сейсмической станцией [Джурик и др., 2015]. Для расчета спектров брали записи акселерограммы общей длительностью 20 с.

Рассчитаны три вида частотных характеристик, где в качестве спектра акселерограммы горизонтальных компонент применялись спектры  $NS$  и  $EW$ , а в качестве вертикальной — спектр  $Z$  компоненты. Это связано с тем, что для решения задач очаговой сейсмологии и при оценке сейсмических воздействий [Оценка..., 1988] возникает необходимость использовать для расчетов частотные характеристики  $U_{NS}$ ,  $U_{EW}$  или абсолютное значение векторной суммы  $U(x)$  двух горизонтальных компонент  $NS$  и  $EW$  [Руководства..., 2000].

В итоге для расчетов амплитудно-частотных характеристик  $U_{NS}$ ,  $U_{EW}$  и  $U(x)$ , использовали выражения:

$$U_{NS} = (H_N/V_Z); U_{EW} = (H_E/V_Z); U(x) = (H_N^2 + H_E^2)^{1/2}/V_Z, \quad (1)$$

где  $H_N$  и  $H_E$  — спектры землетрясений по горизонтальным компонентам  $NS$  и  $EW$ ,  $V_Z$  — спектр по вертикальной компоненте  $Z$ .

В отношении первого способа отмечается, что выбор подхода к исследованиям для оценки спектрального состава колебаний верхних грунтовых слоев при землетрясениях в выделенных мерзлотных и сейсмических зонах (сейсмостанции, см. рис. 1) заключался в использовании записей землетрясений только за их инструментальный (цифровой) период регистрации. Способ основан на предположении, что вертикальная компонента незначительно подвержена влиянию грунтовых условий за исключением случая прохождения поверхностных волн [Nakamura, 1989]. В этом очевидны и недостатки этого метода в отношении получения «истинных» частотных характеристик, поскольку возможны значительные вариации спектрального состава колебаний, связанные с путем распространения сейсмического луча,

**Сейсмические свойства грунтов на участках расположения сейсмических станций на период оттаивания (август—сентябрь) и промерзания (февраль—март, в скобках)**

Сейсмостанция	Инженерно-геологические условия	$h$ , м	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$v_p$ , м/с	$v_s$ , м/с
«Орлик»	Мерзлые валунно-галечно-песчаные отложения	7	2.5	2800 (3100)	1460 (1630)
	Известняки и доломитовые известняки	—	2.6	3800	2000
«Нижнеангарск»	Глыбы, щебень, разрушенные коренные породы	5	2.0	800 (2200)	380 (1100)
	Сильнотрещиноватые коренные породы	6	2.5	2700	1400
	Среднезернистые гнейсовидные биотитовые гранитоиды	—	2.6	3850	1950



углом подхода и другими параметрами. Таким образом, для каждой сейсмостанции уровень частотной характеристики слоя годовых колебаний температур может зависеть от различного типа и интенсивности воздействия  $P$ - и  $S$ -волн с отмеченными регулярными и нерегулярными неоднородностями среды, в которой они распространяются.

В итоге не совсем корректно использовать метод спектральных отношений ( $H/V$ ) для получения АЧХ приповерхностного слоя, обязанного только годовым вариациям температур. В то же время выбранный параметр в какой-то степени позволяет компенсировать спектральные компоненты, вызываемые случайными помехами и получить достаточно надежные оценки преобладающих периодов (частот) колебаний грунтов. Поэтому мы не исключали возможность такого анализа при использовании отдельно записей землетрясений для компонент  $NS$  и  $EW$ .

Если говорить о выбранных подходах в отношении решения поставленных выше задач, можно отметить следующее. Получение истинных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) было бы обосновано при непосредственном установлении сейсмоприемников и одновременной регистрации землетрясений на уровне нулевых годовых колебаний температур. Или в первом приближении основываться на получении относительных спектральных кривых для каждой компоненты, при этом возможно использовать «эталонный грунт», сравнимый по своим параметрам с нижележащими слоями [Оценка..., 1988; Дреннов, Джурик, 2005]. Но и в данном случае влияние самой верхней зоны разреза скальных «эталонных» грунтов на динамические характеристики сейсмического сигнала не учитывается. Такая ситуация считается обоснованной при решении практических задач инженерной сейсмологии. Например, при проведении районирования сейсмической опасности в масштабах строительства, в основе которой реализуется в большинстве случаев именно этот подход [Геология..., 1985].

В нашем случае, при использовании записей зарегистрированных землетрясений для изучения динамики спектрального состава, связанной с годовыми колебаниями температур в Байкальском регионе, можно говорить только об отношении спектров ( $H/V$ ) для каждой компоненты и их результирующей по трем компонентам. Полученные данные с учетом отмеченных недостатков могут быть полезными для решения теоретических и практических задач при расчетах сейсмических воздействий прогнозируемых сильных землетрясений Байкальского региона, охваченного мерзлотой.

## ПОЛУЧЕННЫЙ ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ, ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основой для дальнейшего анализа являются рассчитанные спектры отобранных землетрясений (рис. 2). За указанный выше период регистрации для сейсмостанций «Орлик» и «Нижнеангарск» спектры в большинстве своем имеют восходящую низкочастотную ветвь, далее практически неизменную среднюю часть и нисходящую высокочастотную ветвь. Наряду с подобными спектрами наблюдаются и спектры с двумя ветвями — восходящей и неизменяющейся с частотой. По амплитудному уровню спектры могут различаться на 2—4 порядка, что отвечает интервалу изменения указанных выше магнитуд, эпицентральных расстояний и другим параметрам очагов отобранных землетрясений. Можно отметить и диапазон частот спектров на уровне 0.7 от их максимума, который играет существенную роль при оценке энергетического уровня землетрясений и формирования исходных сейсмических сигналов для исследуемых районов [Джурик и др., 2015]. В нашем случае он может меняться от 2 до 14 Гц.

Для сейсмостанций Нижнеангарск и Орлик спектры (см. рис. 2) по уровню в периоды оттаивания превышают их значения для периодов промерзания грунтов. В большей степени такая закономерность проявляется для сейсмостанции, расположенной в области распространения редких островов мерзлоты. Для  $NS$  и  $EW$  компонент такая закономерность более выражена по сравнению с компонентой  $Z$ .

Количественная оценка отмеченных связей для двух сейсмостанций более наглядно представляется по расчетным частотным характеристикам. Полученные спектры (см. рис. 2) и далее частотные характеристики (рис. 3) при разных землетрясениях имели иногда значительный разброс как по форме, так и по уровню.

В итоге для каждой станции были получены средние частотные характеристики. Разброс частотных характеристик, рассчитанных по методу спектральных отношений [Nakamura, 1989], по уровню в зависимости от частоты оценивался среднеквадратичной ошибкой среднего, которая на рис. 3 показана тонкими линиями. Естественно, что осреднение частотных характеристик по всем выбранным землетрясениям дает более гладкие кривые (толстые линии).

Частотные характеристики, рассчитанные по трем указанным выше выражениям (1), хорошо согласуются по частотному составу колебаний. Их основные максимумы приходятся на одни и те же интервалы частот для периодов оттаивания и промерзания. Это относится к зонам как сплошного, так и островного распространения мерзлоты. Но по амплитудному составу различия значительны для зоны островного распространения мерзлоты, в особенности на частотах более 8—10 Гц. Например, на часто-

тах 16—18 Гц в летний период максимум частотной характеристики может достигать 6—10, а в периоды максимального промерзания они близки к единице.

Очевидно, что наибольшие значения по амплитудному уровню в соответствии с выбранной методикой расчетов относятся к результатам третьего варианта. Но для зон сплошного распространения его изменения на всем диапазоне рассматриваемых частот незначительны. По отношению к зоне островного распространения мерзлоты на низких частотах (0—5 Гц) эти значения сравнимы, на относительно высоких частотах различия для периода промерзания также сравнимы, а для оттаивания могут различаться в 2—4 раза.

Таким образом, при рассмотрении конкретного землетрясения, произошедшего в определенный период времени года, в первом приближении возможно корректировать спектр при его приведении к коренному основанию. Такая необходимость возникает при решении ряда задач, связанных с изучением динамических характеристик сейсмических волн. В частности, при определении параметров затухания сейсмических волн или решении инженерно-сейсмологических задач [Оценка..., 1988], или при задании исходных сейсмических сигналов [Джурик и др., 2015].

Наиболее наглядно отмеченная направленность в изменениях частотного и амплитудного состава колебаний при оттаивании и промерзании грунтов подтверждается при сравнительном анализе частотных характеристик, рассчитанных по двум методам (рис. 4).

По методу спектральных отношений на рис. 4, а приведены совмещенные средние частотные характеристики для годовых периодов оттаивания и промерзания по результатам расчетов для двух станций, показанных на рис. 3. По методу тонкослоистых сред расчеты выполнялись при использовании

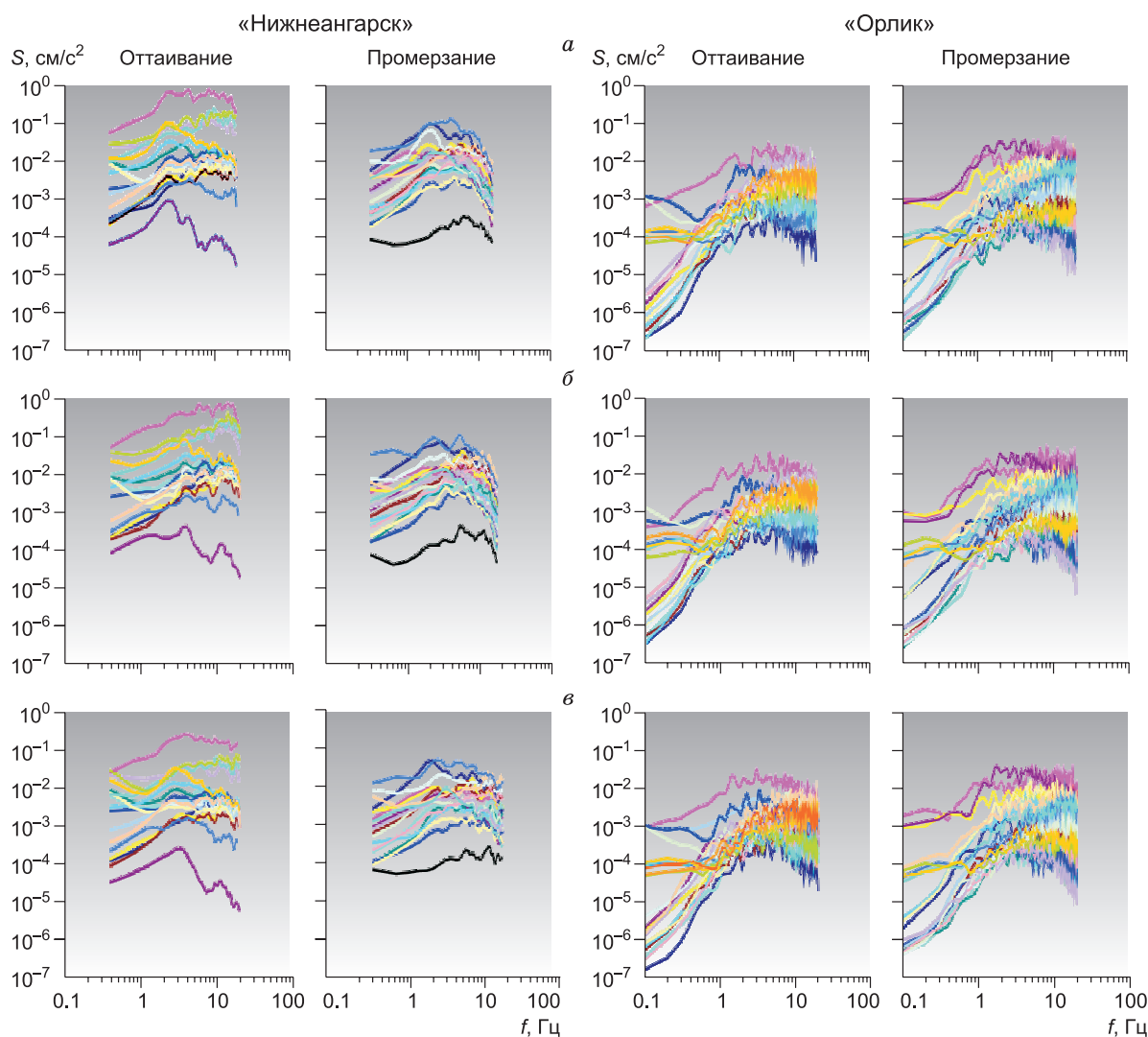
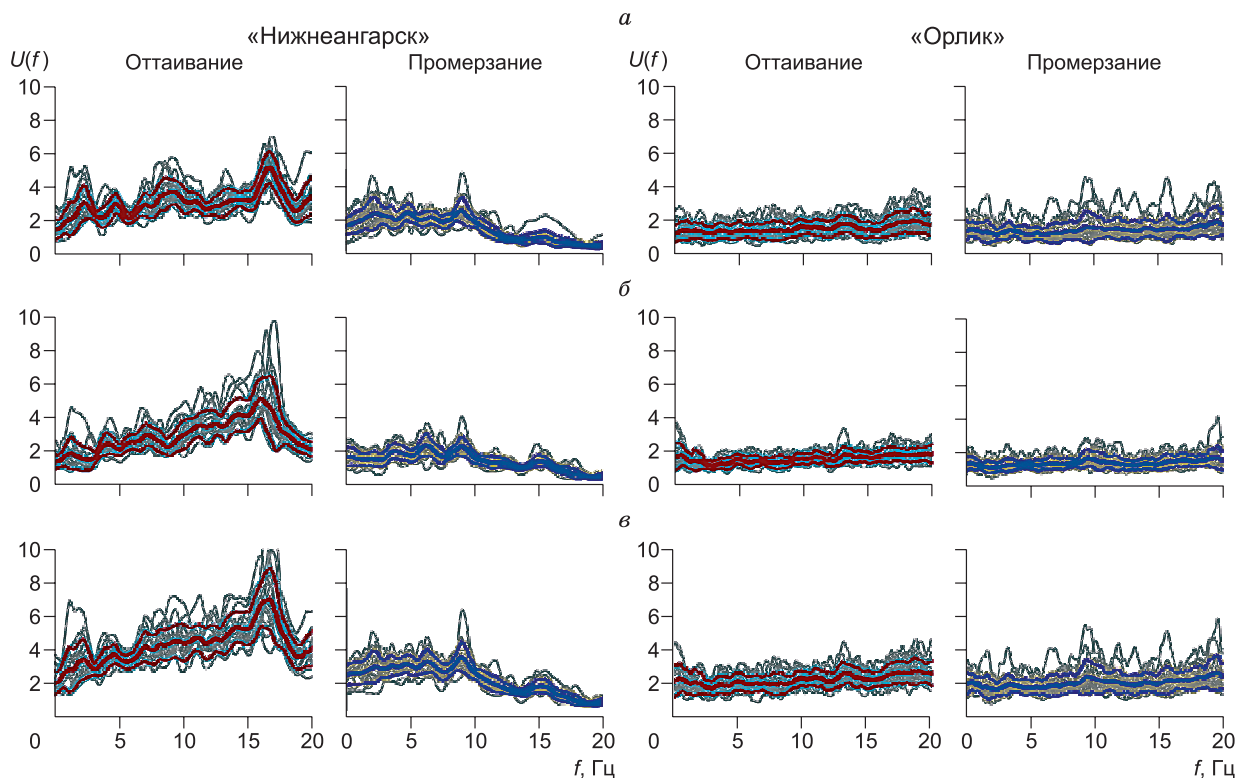


Рис. 2. Спектры землетрясений для *NS* (а), *EW* (б) и *Z* (в) компонент, зарегистрированные сейсмостанциями «Нижнеангарск» и «Орлик» в периоды годовых циклов.

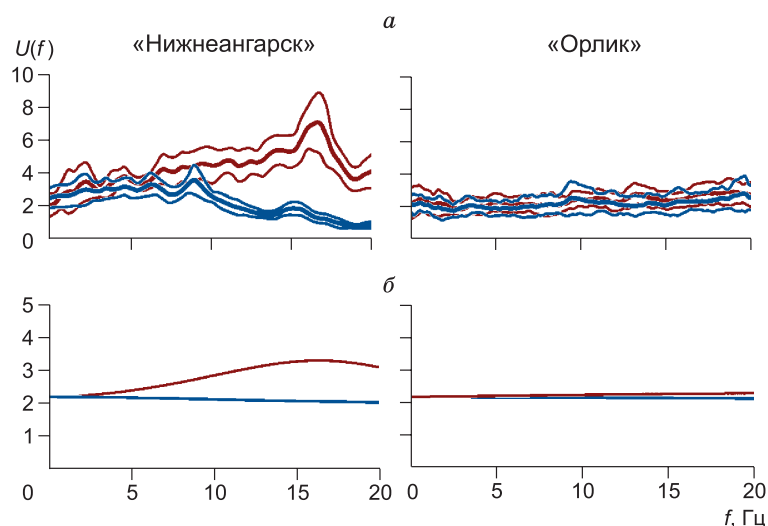


**Рис. 3. Частотные характеристики, рассчитанные по методу спектральных отношений для сейсмостанций «Нижнеангарск» и «Орлик», расположенных в различных мерзлотных условиях, для годовых периодов оттаивания и промерзания грунтов.**

$a$  —  $H_N/V_Z$ ;  $б$  —  $H_E/V_Z$ ;  $в$  —  $(H_N^2 + H_E^2)^{1/2}/V_Z$ . Описание линий см. в тексте.

указанных в таблице распределений скоростей продольных ( $v_p$ ) и поперечных ( $v_s$ ) волн, также для периодов промерзания и оттаивания грунтов.

В итоге сравнительный анализ выполненных расчетов показывает удовлетворительное согласие их результатов. Они хорошо согласуются с диапазоном изменения параметров полученных кривых по частоте (максимумы колебаний приходятся на одинаковый интервал частот). По амплитуде характер их изменения сохраняется, но по величине данные расчетных методов в интервале рассматриваемых частот меняются в пределах от 2.2 до 3.6, а по методу спектральных отношений от 2.3 до 6.5. Несовпадение имеет свои причины и обязано несоответствию приповерхностных объемов рассматриваемых грунтов по двум методам и принимаемых исходных параметров при проведении теоретических расчетов по второму методу.



**Рис. 4. Расчетные амплитудно-частотные характеристики грунтов для сейсмостанций «Нижнеангарск» и «Орлик».**

Периоды оттаивания — темно-красные линии, промерзания — синие линии;  $a$  — метод спектральных отношений,  $б$  — метод тонкослоистых сред.

Нельзя не отметить, что в периоды максимального промерзания частотные характеристики, рассчитанные по двум методам, дают практически одинаковые результаты. Для промороженных консолидированных пород полученные по двум методам результаты хорошо согласуются по частотному и амплитудному составу колебаний. Сказывается минимальное влияние поверхностных волн и подтверждаются теоретические предпосылки методов, отмеченные при обосновании выбранной методики расчетов.

При сезонном оттаивании более выраженными к годовым изменениям температуры являются данные, полученные по методу спектральных отношений. По-видимому, для реализации наиболее обоснованных теоретических расчетов спектральных характеристик по методу тонкослоистых сред в периоды годовых циклов изменения температур под каждой сейсмической станцией необходимы данные режимных измерений  $v_p$  и  $v_s$  с целью выделения аномальных участков. Последние могут характеризоваться положительными или отрицательными градиентами их изменений с глубиной под каждой сейсмической станцией, которые необходимо учитывать при проведении теоретических расчетов.

Аналогичный подход к исследованиям, выполненный для двух сейсмостанций, проведен и в отношении всех сейсмических станций, указанных на рис. 1. Для расчетов частотных характеристик использовалось абсолютное значение векторной суммы  $U(x)$ . Результаты приведены для представительного одинакового количества сейсмостанций, расположенных в различных зонах распространения мерзлоты: сплошного, крупные массивы и островного (рис. 5). Физическая основа для рассчитанных характеристик заключается в следующем: для выбранных сейсмостанций в годовом цикле изменения температур для периода промерзания минимальная кривая среднеквадратичного отклонения в большей степени характеризует величину максимального промерзания или начало цикла оттаивания, максимальная соответственно максимальную глубину оттаивания или начало цикла промерзания.

Сравнить результаты выявленных изменений в зависимости от мерзлотных условий для выбранных сейсмостанций не представляется возможным, как это было отмечено, из-за различий в грунтовых условиях их установки. Хотя для некоторых пар станций в первом приближении такие сравнения возможны, как это было выполнено для станций «Нижнеангарск» и «Орлик», для которых грунтовые условия установки сейсмоприемников в верхней зоне разреза сравнимы по составу и строению.

В нашем случае, несмотря на общую отмеченную закономерность, наиболее консолидированные грунтовые основания сейсмоприемников, связанные или с наличием твердомерзлых грунтов или плотных коренных пород, независимо от их расположения в отношении мерзлотного районирования, могут по диапазону годовых изменений быть сравнимыми (например, станции «Тупик», «Закаменск», «Тырган») или различаться на относительно высоких частотах от уже указанных станций в 2—4 раза («Северомуйск», «Бодайбо» и «Хапчеранга») за счет различия в мерзлотных условиях расположения станций (рис. 5).

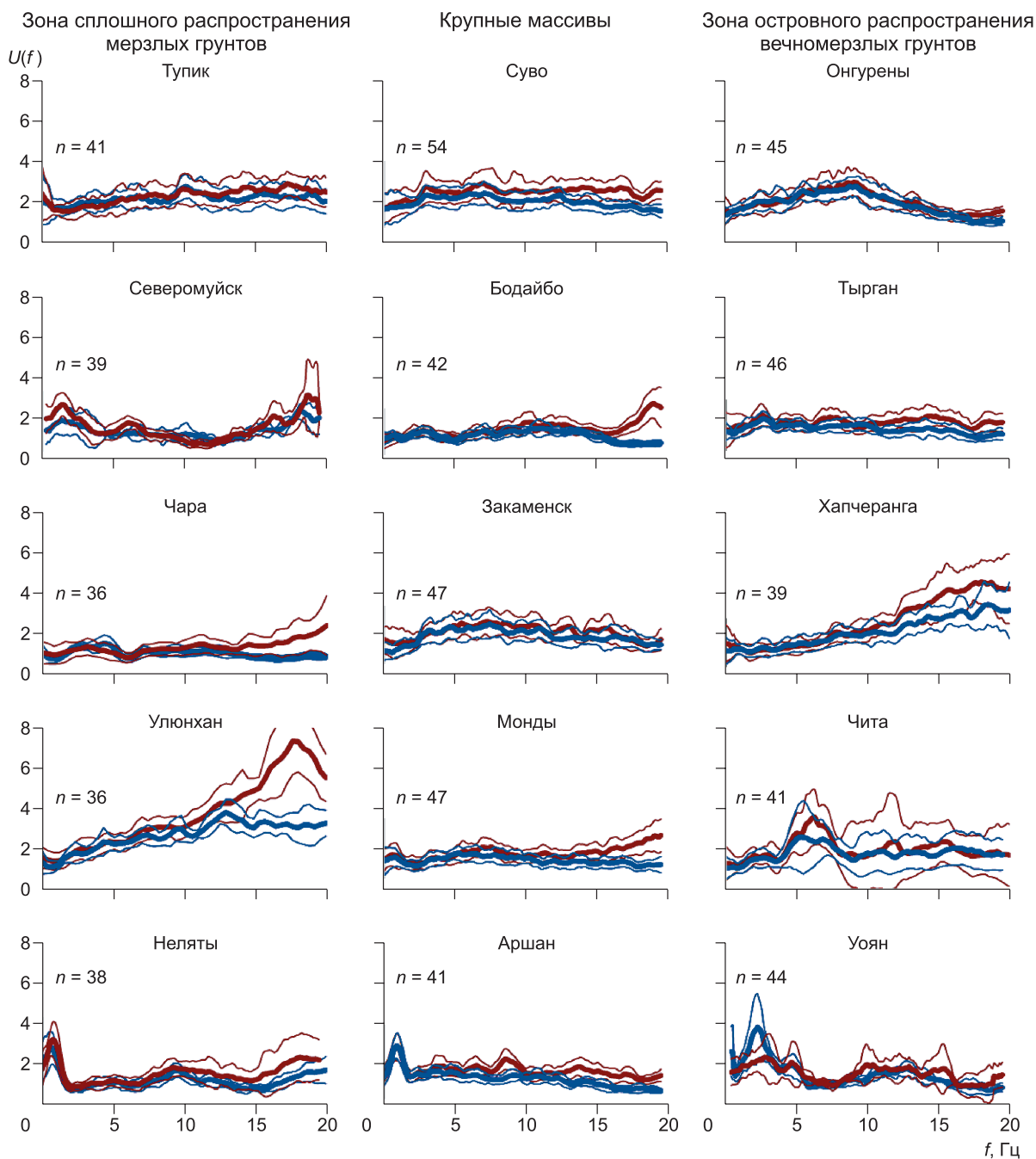
Обращает на себя внимание и увеличение интенсивности колебаний на низких частотах в периоды сезонного оттаивания грунтов на некоторых сейсмостанциях («Северомуйск», «Неляты», «Уоян»). Предположительно это объясняется увеличением колебаний крупных блоков в связи с ослаблением связей между ними в периоды оттаивания в приповерхностной зоне земной коры. В общем этим можно объяснить и увеличение интенсивности колебаний для сейсмостанций, расположенных на относительно сохранных коренных породах, связанное с повышением температуры и протаиванием ледяных включений, цементирующих их трещиноватое состояние. Но для большинства станций в области относительно низких частот увеличение интенсивности колебаний характеризуется сравнимыми интервалами их изменений в периоды годовых циклов промерзания и протаивания.

Представленные результаты расчетов по использованным методам, которые также имеют свои недостатки в отношении получения истинных частотных характеристик приповерхностной динамической зоны разреза, несмотря на выявленную направленность годовых циклов изменений амплитудного и частотного состава регистрируемых колебаний, показывают некоторую неоднозначность в ожидаемых изменениях спектрального состава колебаний при землетрясениях. Это объясняется необходимостью рассмотрения для каждой сейсмостанции, расположенной в определенной мерзлотной зоне, влияния особенностей установки регистрирующей аппаратуры, связанных с учетом состава, строения и состояния грунтов в основании сейсмоприемников и их относительного влияния на конечные результаты.

В то же время с учетом полученных нами данных использованных методов появляется возможность их корректировки по представленным частотным характеристикам, которые необходимы для прогноза изменения спектров зарегистрированных землетрясений для каждой компоненты с расстоянием. В частности, при решении как сейсмологических задач, связанных с необходимостью проведения спектрального анализа записей землетрясений с учетом приповерхностных и глубинных неоднородностей земной коры, так и для прогноза максимальных сейсмических воздействий при районировании сейсмической опасности территорий, охваченных мерзлотой [Джурик и др., 2015].

В отмеченных общих отношениях к решению поставленных задач не исключается использование прямых методов определения частотных характеристик с учетом параметров регистрируемых землетря-





**Рис. 5. Годовые среднеквадратичные отклонения.**

Минимальные (синие) — при промерзании и максимальные (темно-красные) — при оттаивании для различных зон распространения мерзлых грунтов в Байкальском регионе.  $n$  — число отобранных землетрясений.

сений (глубина, механизм и др., при наборе достаточной статистики) для каждой сейсмической станции. Возможны и комплексные режимные температурные и геофизические измерения для выделенных сейсмоклиматических зон Байкальского региона. Такие данные и использование результатов проведенного нами анализа совместно с расчетом относительных частотных характеристик, получаемых при применении различных методов, будут способствовать повышению уровня достоверности изучения динамики спектрального состава колебаний приповерхностного слоя годовых вариаций температур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования при использовании более 200 трехкомпонентных записей землетрясений, зарегистрированных на постоянных сейсмических станциях БФ ГС СО РАН, подтверждают наличие общей закономерности, связанной с относительным уровнем увеличения или уменьшения интенсивности сейсмических колебаний, которые коррелируются с периодическими годовыми колебаниями температур для различных мерзлотных условий Байкальского региона.

На уровне среднеквадратичных отклонений выделены диапазоны влияния сезонных изменений температур на амплитудно-частотный состав колебаний для каждой сейсмической станции. Они в основном проявляются на частотах выше 4—6 Гц и зависят от грунтовых особенностей оснований, на которых установлены сейсмоприемники. Для любых грунтов, служащих основаниями регистрирующей аппаратуры, кривые оттаивания или сравнимы, или значимо выше по уровню их показаний при промерзании грунтов. Эта направленность изменений типична и для относительно сохранных коренных пород.

В периоды максимального промерзания частотные характеристики, рассчитанные по двум использованным методам, дают практически одинаковые результаты. Для промороженных консолидированных пород полученные по двум методам результаты хорошо согласуются по частотному и амплитудному составу колебаний. При сезонном оттаивании более чувствительными к годовым изменениям температуры являются данные, полученные по методу спектральных отношений. Что касается реализации теоретических расчетов спектральных характеристик, то для этого необходимы режимные измерения распределения скоростей продольных и поперечных волн до глубин нулевых колебаний температуры под каждой сейсмической станцией. В нашем случае такие расчеты проведены для фиксированных измерений скоростей сейсмических волн для выбранных сеймостанций.

В итоге результаты исследований направлены на решение задач, связанных с учетом влияния мерзлотных условий Байкальского региона на регистрируемый спектральный состав колебаний при землетрясениях. Они необходимы для решения задач фундаментальной и прикладной сейсмологии, районирования сейсмической опасности и расчета сейсмических воздействий для прогнозируемых сильных землетрясений с учетом мерзлотных особенностей региона.

Работа выполнена по проекту № 0346-2018-0001 программы ФНИ (IX. Науки о Земле), при частичной поддержке РФФИ (грант № 19-05-00232).

## ЛИТЕРАТУРА

- Большая российская энциклопедия** в 35 томах / Ред. С.Л. Кравец. М., 2006, т. 4, 766 с.
- Геокриологическая карта СССР** / Ред. А.Ю. Рогатюк. М-б 1:2 500 000, Лист 11. М., МГУ, 1996.
- Геология и сейсмичность зоны БАМ.** Инженерная геология и инженерная сейсмология. Новосибирск, Наука, 1985, 190 с.
- Дженкинс Г., Баттс Д.** Спектральный анализ и его приложения. Т. 1. М., Мир, 1972, 289 с.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Басов А.Д.** Прогноз сейсмических воздействий в условиях криолитозоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2000, 272 с.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебrenников С.П., Брыжак Е.В., Ескин А.Ю.** Изучение динамических характеристик землетрясений Байкальской рифтовой зоны с целью формирования исходных сейсмических сигналов // Вулканология и сейсмология, 2015, № 5, с. 57—67.
- Джурик В.И., Дреннов А.Ф., Серебrenников С.П., Брыжак Е.В.** Исследование связей характерных частот спектров ускорений с магнитудой для Байкальской рифтовой зоны // Вулканология и сейсмология, 2018, № 1, с. 69—76.
- Дреннов А.Ф., Джурик В.И.** Оценка резонансных частот и скоростных характеристик слоя мерзлых отложений // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (2), с. 217—222.
- Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири** / Ред. П.И. Мельников. М., ГУГК, 1984.
- Некрасов И.А., Климовский И.В.** Вечная мерзлота зоны БАМ. Новосибирск, Наука, 1978, 120 с.
- ОСР-2015.** Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Строительство в сейсмических районах (СП 14.13330.2011). 2015, 28 с.
- Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность: методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию.** М., Наука, 1988, 224 с.
- Расчетные методы в СМР** // Методическое руководство по сейсмическому микрорайонированию. М., Наука, 1988, с. 196—130.
- Руководства по ядерной и радиационной безопасности** «Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ». РБ-006-98. Нормативный документ. М., НТЦ ЯРБ, 2000, 76 с.

**Уошборн А.Л.** Мир холода. Геокриологические исследования. М., Прогресс, 1988, 380 с.

**Briggs M.A., Campbell S., Nolan J., Walvoord M.A., Ntarlagiannis D., Day-Lewis F.D., Lane J.W.** Surface geophysical methods for characterising frozen ground in transitional permafrost landscapes // Permafrost Periglacial Processes, 2017, v. 28, № 1, p. 52—65.

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

**Li S., Lai Y., Zhang M., Yu W.** Seasonal differences in seismic responses of embankment on a sloping ground in permafrost regions // Soil Dyn. Earthquake Eng., 2015, v. 76, p. 122—135.

**Nakamura Y.** A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface // Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 1989, v. 30, p. 25—33.

*Рекомендована к печати 22 мая 2019 г.  
В.С. Селезевым*

*Поступила в редакцию 21 ноября 2018 г.,  
после доработки — 20 марта 2019 г.*