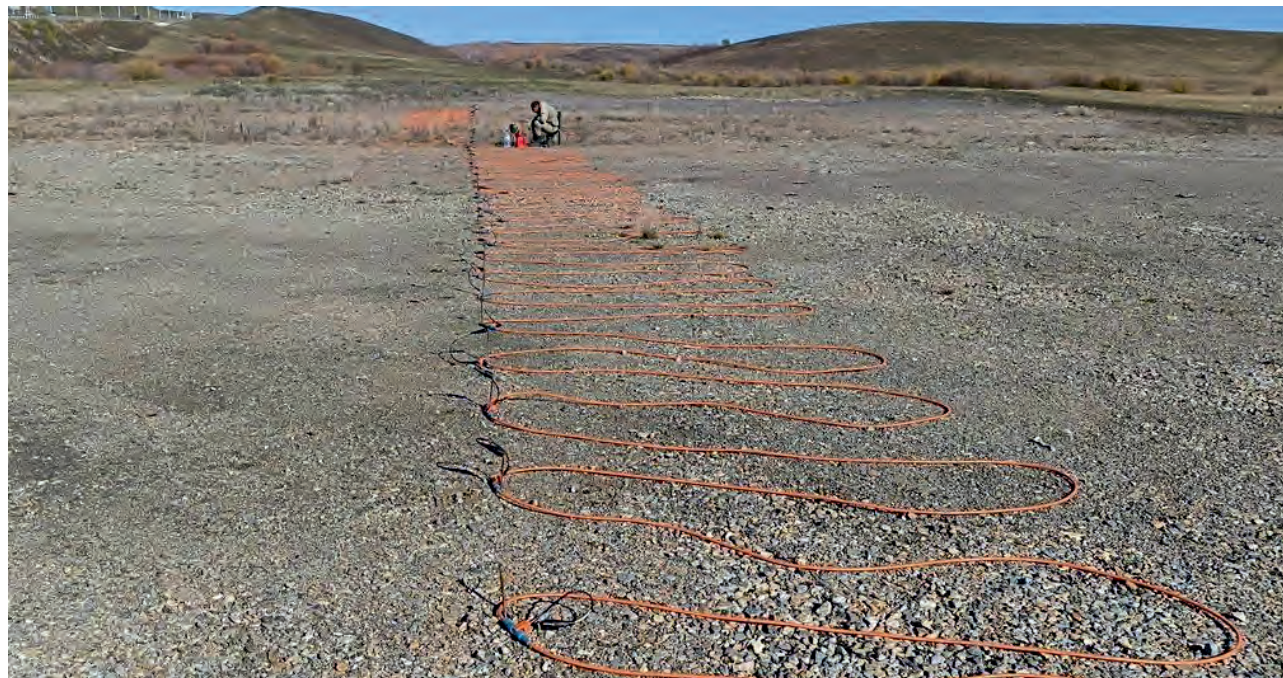


К вопросу о сезонности проведения сейсморазведочных работ для целей сейсмического микрорайонирования в районах распространения многолетнемерзлых грунтов

- Кауркин М.Д., Андреев Д.О., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, к.т.н., г. Москва.
- Кауркин В.Д., Лаборатория механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты № 18 НИИОСП им. Н.М. Герсевича, АО «НИЦ «Строительство», г. Москва.
- Фаргиев И.И., Воробьев М.А., РГГРУ им. Серго Орджоникидзе, г. Москва.

Аннотация: В статье представлены результаты комплексирования метода инженерной сейсморазведки и электротомографии на участке распространения многолетнемерзлых грунтов. Показано, что наличие сезонно-мерзлого слоя приводит к завышению значений скоростей поперечных волн в верхней части разреза и искажению положения преломляющих границ. Сопоставление данных, полученных в июне и сентябре, демонстрирует существенное изменение глубин преломляющей границы. Обосновывается необходимость проведения полевых сейсморазведочных работ для целей сейсмического микрорайонирования в период максимального сезонного оттаивания грунтов (позднее лето – начало осени) либо введения соответствующих поправок при интерпретации материалов, полученных в другое время года.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, инженерная геофизика, электротомография, сейсморазведка, криолитозона, сейсмическое микрорайонирование.



Введение

Значительная часть территории Российской Федерации расположена в сейсмоактивных регионах, для которых также характерно широкое распространение многолетнемерзлых грунтов.

Сейсмическое микрорайонирование (СМР) является обязательным видом работ при выполнении инженерно-геологических изысканий в сейсмически опасных районах [1, 2]. Одной из ключевых задач СМР является определение

скоростей распространения поперечных волн (V_s) в грунтовой толще на участке изысканий, поскольку они непосредственно используются для расчета приращения сейсмической интенсивности и построения сейсмогеологических моделей [3,4,5].

Скорости распространения поперечных волн получают по результатам полевых сейсморазведочных работ, выполняемых, как правило, однократно.

Как известно, существенное влияние на физико-механические свойства грунтов оказывает их температурное состояние. Переход грунтов из талого состояния в мерзлое приводит к кардинальному изменению упругих характеристик: скорости продольных и поперечных волн в верхней части разреза.

Время проведения полевых сейсморазведочных работ зачастую продиктовано сроками проведения изысканий и не всегда учитывает сезонное оттаивание (промерзание) верхней части разреза. Игнорирование этого фактора при проведении сейсморазведочных работ в период, когда сезонно-мерзлый слой еще не оттаял, может привести к формированию некорректной скоростной модели разреза, ошибкам в определении положения кровли многолетнемерзлых грунтов и, как следствие, к неверной оценке сейсмичности площадки.

Методика проведения исследований

В рамках научных исследований, выполняемых Институтом геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, на стационарном посту наблюдения за метеорологическими и мерзлотными условиями на 288-ом км автодороги Р-297 «Амур» были проведены комплексные инженерно-геофизические исследования, в состав которых входили сейсморазведочные работы и электротомография.

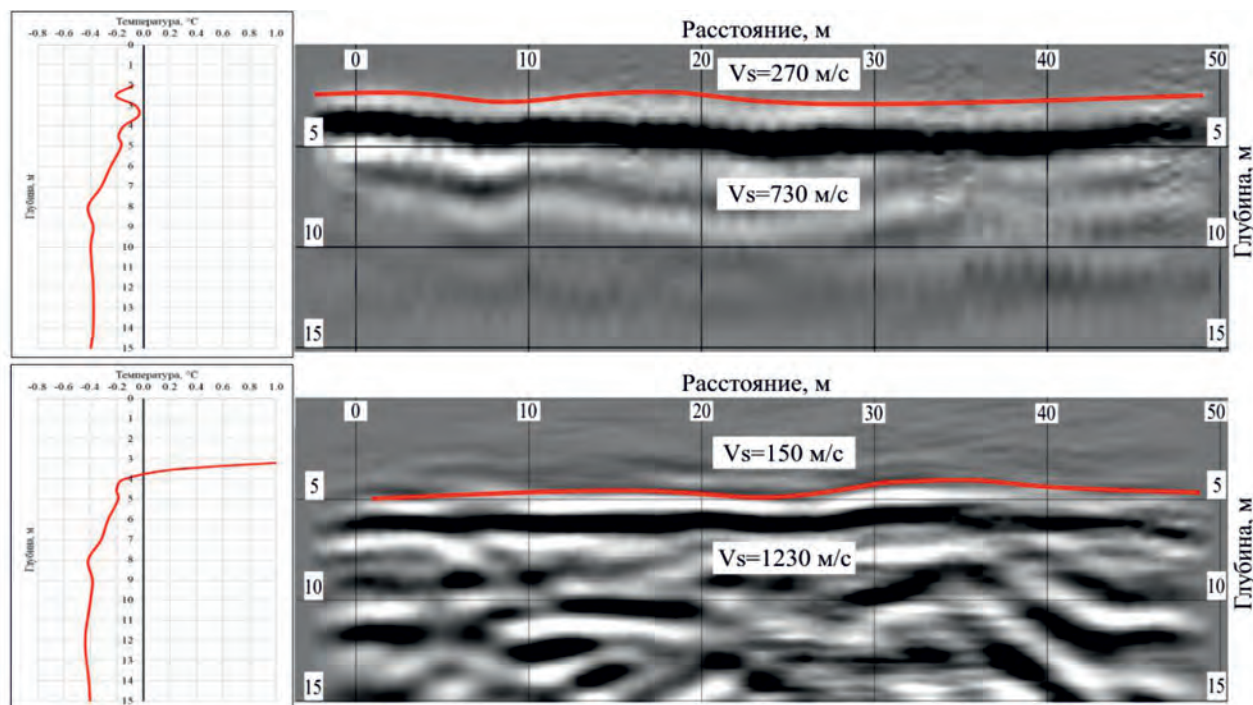
Для проведения сейсморазведки методом преломленных волн в модификации общей глубинной площадки (МПВ-ОГП) использовалась 24-канальная станция «Geode» (Geometrics, США) с шагом приема 1 м и шагом возбуждения, равным шагу приема. Возбуждение SH-волн производилось ударами кувалдой в горизонтальном направлении перпендикулярно профилю по методике «+/-». Такая методика работ была обусловлена необходимостью детального расчленения верхней части разреза и повышения точности определения скорости поперечных волн [6,7]. Обработка данных выполнялась в программе SeisShall с построением глубинных разрезов по стандартной методике МПВ-ОГП.

Электротомография (ЭТ) выполнялась аппаратно-программным комплексом «Скала-48» (КБ Электрометрии, Россия) с шагом между электродами 1 м. Инверсия данных проводилась в программе ZondRes2D.

Исследования проводились по шести профилям в два этапа: в июне (период начала оттаивания сезонно-мерзлого слоя) и в сентябре (период максимального оттаивания) 2025 г. Такая схема работ позволила получить сопоставимые данные по одним и тем же профилям в разные сезоны и количественно оценить влияние состояния грунтов верхней части разреза на геофизические параметры.

Результаты исследования

Основной интерес для целей СМР представляют результаты сейсморазведки МПВ-ОГП, полученные в июне и сентябре на одних и тех же профилях. Наиболее простые в сейсмическом плане геокриологические условия наблюдаются по профилю ПР-1 (рисунок 1) при сливающейся мерзлоте. На глубинном разрезе, полученном в июне, преломля-



▲ Рис. 1. Глубинный разрез МПВ-ОГП по профилю ПР-1 (сверху работы выполнены в июне, снизу выполнены в сентябре).

ющая граница приурочена к границе оттаивания. В сентябре при полном отсутствии сезонно-мерзлого слоя преломляющая граница соответствует кровле многолетнемерзлых грунтов (ММГ). При этом следует обратить внимание на существенное расхождение в значениях скоростей поперечных волн (V_s), полученных в разные периоды года. Для первого слоя наблюдается завышение значения V_s , а для второго слоя, напротив, наблюдается занижение скорости поперечных волн.

Для того, чтобы обозначить проблему выбора сезона проведения сейсморазведочных работ для целей СМР, более наглядно произведем расчет приращения сейсмической интенсивности (ΔI) в соответствии с действующими нормативными документами.

Рассмотрим расчет (ΔI) в соответствии с требованиями РСН 60-86 [8] и РСН 65-87 [9] (формула 1), которые регламентируют требования для площадок строительства зданий и сооружений нормального уровня ответственности.

$$\Delta I_{\text{с.ж.}} = 1,67 \cdot \lg \left(\rho_0 V_0 / \rho_i V_i \right); \quad (1)$$

где $\rho_0 V_0$ – произведение плотности грунта на среднюю скорость продольной (поперечной) волны – средняя сейсмическая жесткость эталонной грунтовой толщи); $\rho_i V_i$ – тот же параметр на изучаемом участке.

Мощность расчетной толщи примем равной 10 м и следующие характеристики эталонных (референтных) грунтов: скорость распространения поперечных волн $V_0 = 300$ м/с, плотность $\rho_0 = 1,75$ г/см³.

Результаты расчета приращения сейсмической интенсивности приведены в таблице 1. Для проведения расчетов по данным измерений в сентябре следовало бы принять в качестве параметров референтных грунтов свойства грунтов I категории по сейсмическим свойствам. Однако это бы вызвало путаницу и сложности в сопоставлении результатов, поэтому в расчетах применялись характеристики эталонных грунтов, выбранные ранее.

Название профиля	$\rho_{\text{ср}}, \text{ г/см}^3$	$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	$\Delta I_{\text{сж}}, \text{ балл}$
ПР - 1 (июнь)	2	544	-0.53
ПР - 1 (сентябрь)	1.99	317	-0.13

▲ Табл. 1.

Для объектов транспортной инфраструктуры, к которым относится автодорога Р-297 «Амур» расчет ΔI должен выполняться в соответствии с СП 269.13258-00.2016 [10].

Формула расчета приращения сейсмической интенсивности по СП 269.13258-00.2016 (формула 2) несколько отличается от РСН 60-86 и РСН 65-87 (формула 2).

$$\Delta I_{\text{сж}} = 1,67 \lg(655/\rho V_s); \quad (2)$$

где ρV_s – сейсмическая жесткость грунта расчетной толщи, $\text{т}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; ρ – нормативная плотность грунта, $\text{т}/\text{м}^3$; V_s – скорость поперечных сейсмических волн в расчетной толще, м/с .

Отличия заключаются в следующем: во-первых, в последней формуле указано точное и постоянное значение сейсмической жесткости «эталонной грунтовой толщи», во-вторых, в формуле 1 рассчитываются отдельно средневзвешенные значения для ρ и V_s , в формуле 2 производится расчет средневзвешенной сейсмической жесткости (ρV_s) [4].

Результаты расчета в соответствии с СП 269.1325800.2016 приведены в таблице 2.

При сравнении полученных результатов (таблица 1,2) можно увидеть существенные отличия в значениях приращения сейсмической интенсивности в зависимости от выбранной методики расчета. В случае расчета в соответствии с РСН 60-86 и РСН 65-87 наблюдается

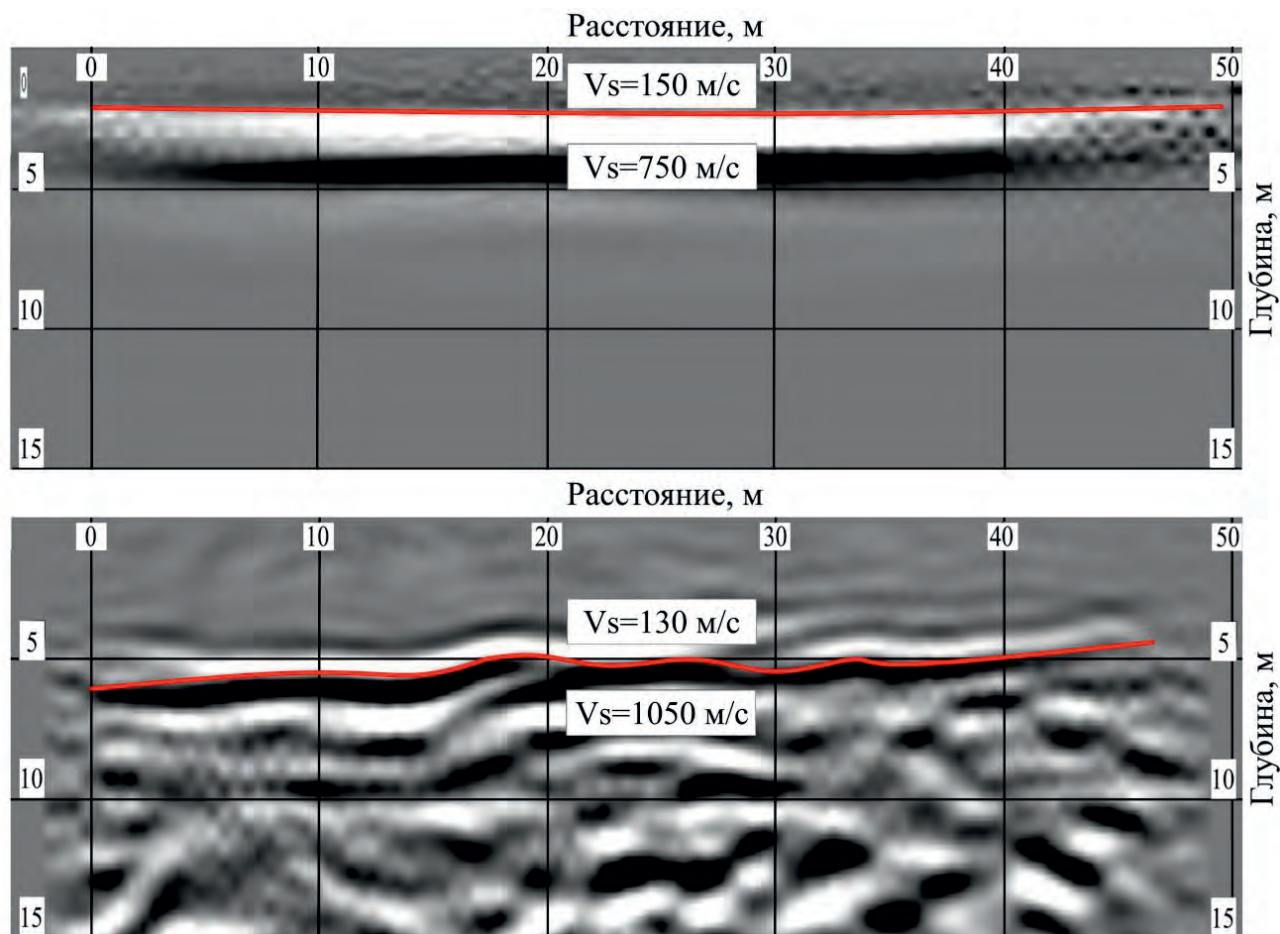
значительное занижение ΔI в зависимости от сезона проведения, при этом результаты расчета по 269.1325800.2016, напротив, его завышают. Такое неоднозначное влияние наличия сезонно-мерзлого слоя на результаты расчета ΔI объясняется различиями в подходах к определению сейсмической жесткости в указанных нормативных документах.

Следует отметить, что в обоих рассмотренных случаях приращение расчетной сейсмичности является отрицательным, что в целом снижает итоговую расчетную сейсмичность площадки исследований.

Значительно более сложную задачу для интерпретации и расчета сейсмичности представляют разрезы с несливающейся мерзлотой. Основная проблема заключается в том, что сейсморазведка не позволяет выделить низкоскоростные талые участки, залегающие под более высокоскоростным сезонно-мерзлым слоем. На сейсморазведочных данных, полученных в июне (рисунок 2), четко фиксируется преломляющая граница на глубине 2 м, соответствующая кровле сезонно-мерзлого слоя (границе оттаивания). При этом нижележащие слои на глубинном разрезе не дифференцируются. На разрезах, полученных в сентябре, преломляющая граница имеет неровную форму и прослеживается в интервале ПК0-ПК20 на глубине 7,5 м, что существенно отличает данный разрез от рассмотренного ранее (рисунок 1). Таким образом, опираясь

► Табл. 2.

Название профиля	$\rho V_s, \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$\Delta I_{\text{сж}}, \text{ балл}$
ПР - 1 (июнь)	1275	-0.48
ПР - 1 (сентябрь)	1595	-0.65



▲ Рис. 2. Глубинный разрез МПВ-ОГП по профилю ПР-2 (сверху работы выполнены в июне, снизу выполнены в сентябре).

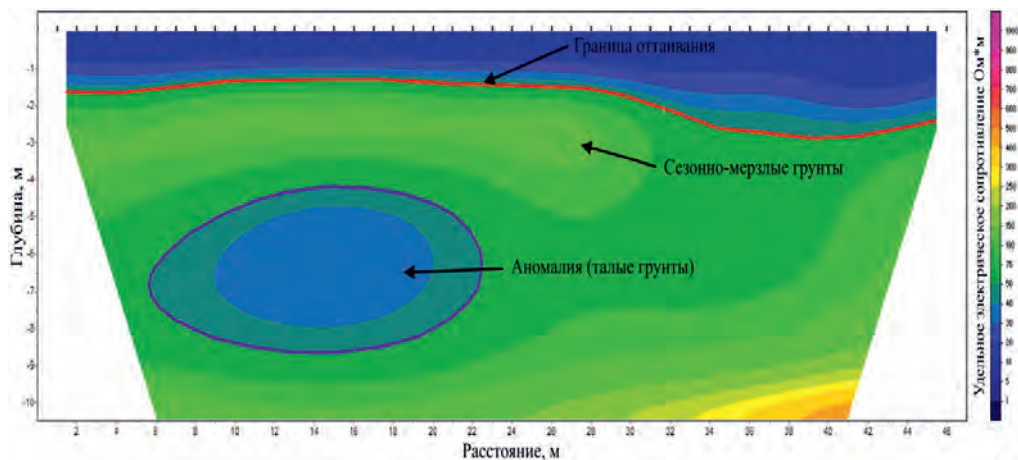
исключительно на результаты сейсморазведочных работ, выполненных в июне, можно ошибочно сформировать сейсмогеологическую модель, соответствующую сливающейся мерзлоте.

Известно, что методы электроразведки обладают более высокой чувствительностью к фазовым переходам грунтов из талого состояния в мерзлое и лишены

вышеуказанных ограничений, присущих сейсморазведке.

Если обратиться к данным электротомографии, полученным в июне по профилю ПР-2 (рисунок 3), то в интервале ПК6-ПК20 можно увидеть аномальную зону пониженных значений удельного электрического сопротивления, характерных для талых грунтов.

► Рис. 3. Разрезы удельного электрического сопротивления по профилю ПР-2.



Название профиля	$\rho_{\text{ср}}, \text{ г/см}^3$	$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	$\Delta I_{\text{сж}}, \text{ балл}$
ПР - 2 (июнь)	2	417	-0.33
ПР - 2 (сентябрь)	1.99	166	0.34

▲ Табл. 3.

Название профиля	$\rho V_s, \text{ т/(м}^2 \cdot \text{с)}$	$\Delta I_{\text{сж}}, \text{ балл}$
ПР - 1 (июнь)	1259	-0.47
ПР - 1 (сентябрь)	718	-0.07

▲ Табл. 4.

Таким образом, комплексирование результатов сейсморазведки и электро-томографии позволяет более точно составить сейсмогеологическую модель для расчетов даже в период частичного оттаивания сезонно-мерзлых грунтов.

Выполним расчет приращения сейсмической интенсивности для случая несливающейся мерзлоты, показанном на рисунке 2. Результаты расчетов по РСН 60-86, РСН 65-87 и СП 269.1325800.2016 показаны в таблице 3 и 4.

Сравнение результатов показывает, что независимо от применяемой методики расчета, значения расчетной сейсмичности исследуемой площадки, полученные по июньским данным, существенно занижены относительно результатов, полученных по измерениям в сентябре.

При этом в случае расчета по сентябрьским данным в соответствии с РСН 60-86, РСН 65-87 было получено положительное приращение сейсмической интенсивности, что увеличит итоговую расчетную сейсмичность площадки исследования относительно уточненной исходной сейсмичности. Важно подчеркнуть, что если ранее возможные ошибки в определении ΔI выражались исключительно в различной степени снижения исходной сейсмичности, то в данном случае будет наблюдаться ее увеличение.

Выводы

Результаты выполненных исследований можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Результаты сейсморазведочных работ, проведенные в разные сезоны на участках развития многолетнемерзлых грунтов, могут отличаться не только по глубине залегания на преломляющей границе, но и по значениям скоростей поперечных волн в выделяемых слоях.

2. В зависимости от методики расчета приращения сейсмической интенсивности были получены существенно отличающиеся значения. Характер влияния сезонно-мерзлого слоя на результаты расчета ΔI не является однозначным и зависит от применяемого подхода.

3. На основании полученных данных рекомендуется выполнять сейсморазведочные работы для целей сейсмического микрорайонирования в период полного отсутствия сезонно-мерзлого слоя во избежание ошибок в составлении сейсмогеологической модели и последующих расчетах приращения сейсмической интенсивности.

4. В случае необходимости выполнения сейсморазведочных работ в период наличия сезонно-мерзлого слоя для составления более корректной сейсмогеологической модели требуется комплек-

сирование с результатами электроразведочных работ (электротомография, вертикальное электрическое зондирование и т.д.).

5. Приведенные результаты указывают на необходимость дальнейшего изучения и мониторинга изменения сейсмических свойств многолетнемерзлых грунтов для совершенствования методик сейсмического микрорайонирования в криолитозоне.

Литература

1. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. М.: Стандартинформ, 2018.

2. СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования. М.: Стандартинформ, 2017.

3. Сейсмическое микрорайонирование / Под ред. С.В. Медведева. – М.: Наука, 1977. – 336 с.

4. Кауркин М.Д., Романов В.В., Андреев Д.О. Особенности проведения расчета сейсмической интенсивности на участках распространения скальных грунтов. Инженерные изыскания. 2021. Т. 15. № 3-4. С. 70-79.

5. Кауркин М.Д., Кауркин В.Д. О необходимости разработки методики прогноза изменения сейсмичности на участках распространения многолетнемерзлых грунтов. Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. № 1 (84). С. 72-76.

6. Романов В.В., Кауркин М.Д., Крячков И.В., Бабуркин И.А. Опыт реализации инженерной сейсмической томографии со сверхмалым шагом приема. Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. № 1 (84). С. 123-127.

7. Романов В.В., Кауркин М.Д., Андреев Д.О. Влияние шага приема на результаты метода преломленных волн в инженерной сейсморазведке. Приборы и системы разведочной геофизики. 2025. № 3 (86). С. 90-93.

8. РСН 60-86, Республиканские строительные нормы. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ., МосЦТИСИЗ Госстроя РСФСР, М., 1986, 32 с

9. РСН 65-87 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. М.: МосЦТИСИЗ Госстроя РСФСР. – 1987.

10. СП 269.1325800.2016 Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического микрорайонирования. М.: Стандартинформ, 2017.