

Выбор шага приёма при выполнении инженерной сейсморазведки для сейсмического микрорайонирования

- Романов В.В., Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва.
- Кауркин М.Д., Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, г. Москва.

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы обоснованного выбора шага приёма систем наблюдений инженерной сейсморазведки, применяемой в методе сейсмических жёсткостей

Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, шаг приёма, метод сейсмических жёсткостей, сейсмическое микрорайонирование, инженерная сейсмология

Введение

В области приповерхностного залегания многолетнемерзлых грунтов (ММГ) находится свыше 60% территории Российской Федерации [Порфирьев и др., 2019], к ней же относится больше половины сейсмоактивных районов нашей страны. Это Иркутская и Читинская области, Бурятия, прибрежные районы Якутии, Магаданской и Камчатская область. В перечисленных регионах интенсивность землетрясений варьируется в пределах от 6 до 10 баллов по шкале MSK-64 [Пегин, 2023].

Особый интерес представляют районы с неглубоко залегающей кровлей ММГ, так как именно приповерхностная грунтовая толща определяет форму колебаний и амплитуду сейсмических волн сейсмических волн, создаваемых землетрясениями [Павленко, 2020].

Для оценки приращения интенсивности ΔI применяется инструментальный **метод сейсмических жёсткостей**, основанный на формуле С.В. Медведева (1) [Джурик и др., 2018]. В каждом пункте i , где выполняется находится приращение интенсивности, определяется отношение эффективной акустической жёсткости γ_i к эффективной жёсткости базовых (референс) грунтов γ_0 ,

$$\Delta I_i = -1.67 \lg \frac{\gamma_i}{\gamma_0} \quad (1)$$

Вопрос о мощности приповерхнос-

тной грунтовой толщи H , в которой вычисляются жёсткости МСЖ (расчётной), остаётся дискуссионным. Большинство авторов и нормативных документов сходятся в оценке $H = 10\text{--}30$ м [Павленко, 2020]. Значение H входит в формулы оценки средних сейсмических и плотностных свойств расчётной толщи параметрам слоёв скоростного разреза (n - номер самого глубокого слоя, подошва которого находится в пределах расчётной толщи, h , V - мощности и пластовые скорости слоёв толщи).

$$\frac{1}{\tilde{V}} = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} h_j \frac{1}{V_j} + (H - \sum_{j=1}^{n-1} h_j) \frac{1}{V_n}}{H} \quad (2)$$

$$\tilde{\rho} = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} h_j \rho_j + (H - \sum_{j=1}^{n-1} h_j) \rho_n}{H}$$

$$\gamma_i = \tilde{V}_i \cdot \tilde{\rho}_i$$

Средняя скорость, входящая в выражение (1), определяется методами инженерной сейсморазведки — МПВ, СТ, МОВ или ВСП. Промерзание грунта приводит к возрастанию скоростей продольных и поперечных волн за счёт увеличения упругих модулей с одновременным уменьшением плотности. Глубина кровли многолетнемерзлых грунтов варьируется в очень широких пределах. Для ММГ характерна значительная изменчивость упругих свойств как в пространстве (по глубине и латерали), так и во времени из-

за сезонных колебаний температуры. Следовательно, в таких условиях МСЖ должен базироваться на методах, позволяющих оперативно проследить неглубокие границы криолитозоны, в том числе и в режиме мониторинга.

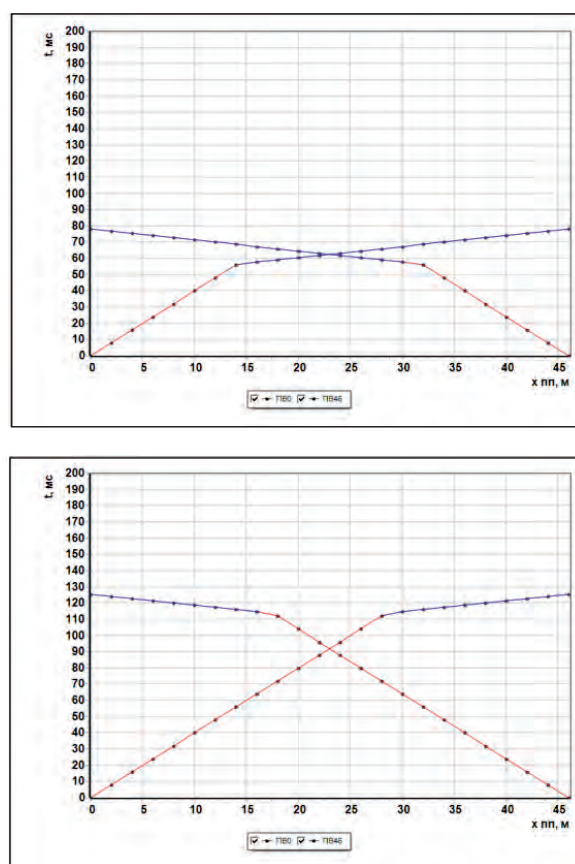
Мобильным, экономически оправданным решением проблемы экспериментального определения модели скоростного разреза расчётной толщи является наземная сейсморазведка [Кувалдин и др., 2014]. В первую очередь, это методы, основанные на обработке годографов волн, прослеживаемых в первых вступлениях — преломлённых (МПВ) и рефрактированных (СТ) [Романов, Гапонов, 2014]. Это связано с тем, что в верхней части разреза, как правило, надёжно выделяются две–три контрастные границы, где увеличивается как истинная скорость, так и её первая вертикальная производная — градиент [Романов и др., 2025]. Метод отражённых волн находится здесь в подчинённом положении, так как по отражённым волнам находится эффективная скорость, характеризующая разрез над границами. В случае если все отражающие границы залегают выше подошвы расчётной толщи, задача определения средней скорости по данным МОВ становится нерешаемой.

По мнению, высказанному в работе [Алешин, 2016] мощность расчётной толщи $H = 10$ м недостаточна, так как она меньше четверти ожидаемой предельной длины сейсмических волн (100 м), создаваемыми землетрясениями. Под влиянием мировой тенденции в современных российских нормах величина H была увеличена до 30 м [Алешин, 2021]. Увеличение H с 10–20 м до 30 м означает пропорциональное возрастание глубинности методов, применяемых для оценки пластовых скоростей продольных и

поперечных волн. В МПВ глубинность оценивается как $1/6$ от длины приёмной линии (расстановки) при высокой контрастности границ, в СТ — $1/3$ длины.

Простой расчёт показывает, что применение распространённой системы на основе 24-канальной станции и шага приёма 2 м обеспечивает глубинность МПВ при выделении резких контрастных границ не более 7 м. Если длина расстановки оказывается меньше двух удалений точки излома целевой волны, то встречные годографы пересекаются вне зоны прослеживания преломлённой волны. В таком случае более половины точек встречных годографов будут получены дополнением по нагоняющим, что отрицательно сказывается на точности определения рельефа границ.

Рациональным решением увеличения



▲ Рис. 1. Встречные годографы первых вступлений при прослеживании кровли ММГ на глубине 6 м (верхний рисунок) и 12 м (нижний рисунок).

глубинности методов первых вступлений на первый взгляд представляется увеличение шага приёма с сохранением канальности применяемых станций. Использование 24-канальных кос в перспективе позволяет проследить преломляющие границы на глубинах 15 м ($\Delta x_{пп} = 4$ м) и 20 м ($\Delta x_{пп} = 5$ м). Однако увеличение шага приёма означает возрастание погрешности в определении скоростных характеристик (пластовых и начальных скоростей) и глубин преломляющих границ [Романов, 2012].

В районах с неглубоким залеганием кровли мерзлоты и сложным строением деятельного слоя последнее обстоятельство носит решающий характер, что доказывается в предлагаемой статье.

Методика и результаты численного эксперимента

Для районов с неглубоким залеганием ММГ характерны низкие значения скорости поперечных волн в покрывающей толще ($V_s = 100\text{--}200$ м/с), резкое

увеличение истинной скорости в кровле ММГ ($V_s > 1000$ м/с), значительная рефракция лучей падающей волны и сложный рельеф преломляющей границы. На рисунке 2 показаны сейсмограммы, полученные методом преломлённых волн на поперечных волнах (схема Y-Y), в летнее (июнь) и осеннее (октябрь) время на полигоне РАН. Заметны изменения как в кинематике (скорости и времена вступления), так и в динамических свойствах (амплитуды, длина импульса).

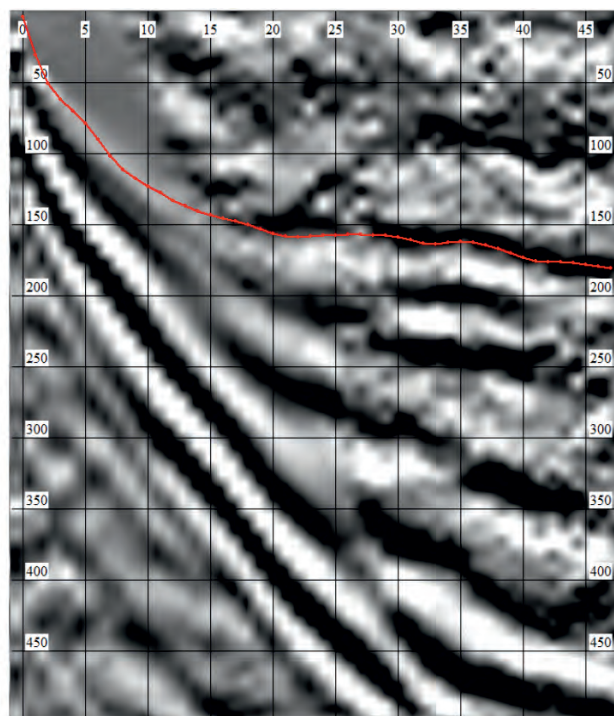
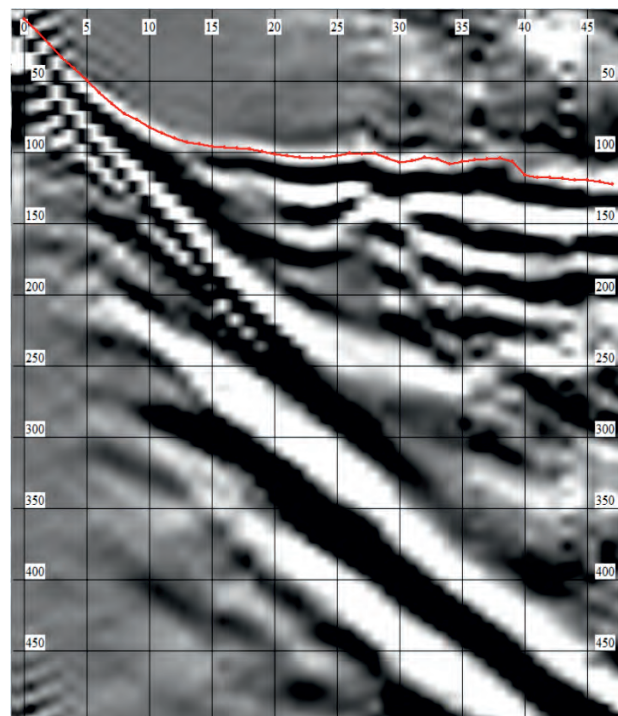
На основе анализа и обработки сейсмограмм, показанных на рисунке 2, составлена трёхслойная однородно-слоистая модель (Таблица 1).

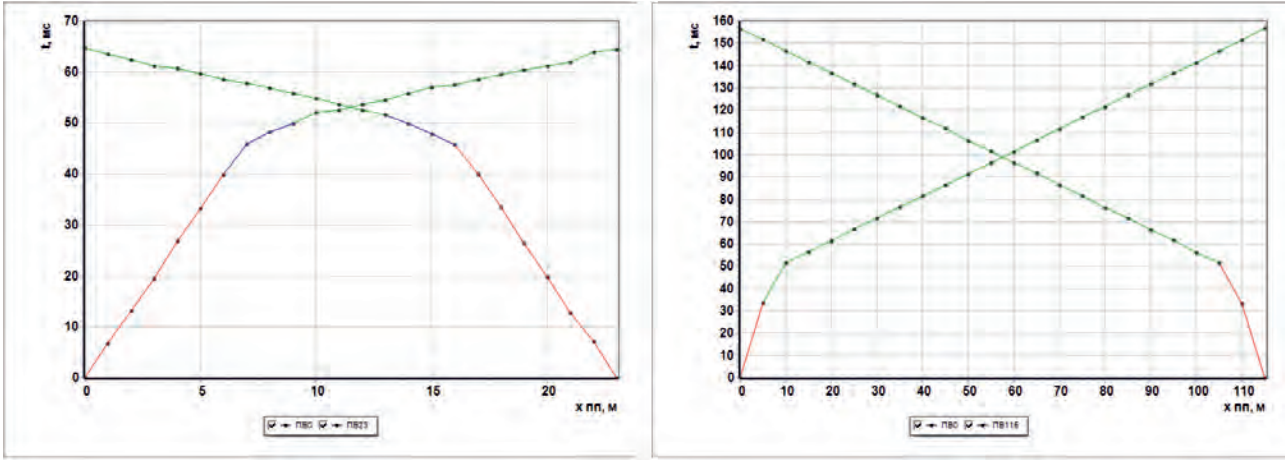
▼ Табл. 1. Сейсмогеологическая модель.

Слой	h , м	V_s , м/с
1	2,5	150
2	2,5	700
3	—	1000

Для моделирования были выбраны две встречные расстановки, включающие приёмную линию с порядком $N=24$ и

▼ Рис. 2. Сейсмограммы МПВ (схема Y-Y), полученные в октябре (слева) и июне (справа). Красной линией обозначен годограф первых вступлений.





▼ Рис. 3. Годографы первых вступлений, полученные с шагом приёма 1 м (слева) и 5 м (справа). Цветными линиями показаны зоны прослеживания прямой (красный) и преломлённых (синий, зелёный) волн.

шагом приёма $\Delta x_{пп} = 1, 2, 4$ и 5 м. Для каждой расстановки был вычислен годограф первых вступлений (Рисунок 3), а по нему определены параметры модели скоростного разреза способом пластовых скоростей.

В результате обработки находились погрешности относительно точных параметров модели, дополнительно вычислялись средневзвешенная акустическая (сейсмическая) жёсткость расчётной толщи и приращение интенсивности при условии, что $H=30$ м, $\rho_i = 1.8$ г/см³, а $\gamma_0=665$ т/(м²·с). В таблице 2 показано, что погрешности определения параметров расчётной толщи растут в геометричес-

кой прогрессии с увеличением шага приёма. Максимальные относительные погрешности наблюдаются при определении мощности первого слоя и пластовой скорости второго слоя.

При выборе шага приёма $\Delta x_{пп} = 5$ м на годографах первых вступлений теряется зона прослеживания волны, образованной в кровле первого слоя [Романов и др., 2025], что вызывает переуглубление границы и вносит сильную погрешность в значение как пластовой скорости первого слоя, так и в среднюю скорость всей расчётной толщи. То есть явление, подобное выпадению слоя, здесь объясняется неверным выбором шага приёма. Если

▼ Табл. 2. Влияние шага приёма на результаты метода сейсмических жёсткостей.

	h_1 , м	h_2 , м	V_1 , м/с	V_2 , м/с	V_3 , м/с	γ_i , т/(м ² ·с)	ΔI , балл
Точное	2.5	2.5	150	400	1000	1127	-0.38
$\Delta x_{пп} = 1$ м	2.5	2.5	152	503	994	1160	-0.40
$\Delta x_{пп} = 2$ м	2.7	2.6	164	500	1006	1168	-0.41
$\Delta x_{пп} = 4$ м	3.1	2.3	168	643	1002	1159	-0.40
$\Delta x_{пп} = 5$ м	4.9	-	270	-	999	1248	-0.46
	δh_1 , %	δh_2 , %	δV_1 , м/с	δV_2 , м/с	δV_3 , м/с	$\delta \gamma_i$, %	$\delta \Delta I$, %
$\Delta x_{пп} = 1$ м	0	0	1	26	-1	3	5
$\Delta x_{пп} = 2$ м	8	4	9	25	1	4	7
$\Delta x_{пп} = 4$ м	24	-8	12	61	0.2	3	5
$\Delta x_{пп} = 5$ м	96	-	80	-	-0.1	11	19

установить, что значимые относительные погрешности начинаются с 10%, то точное восстановление параметров модели скоростного разреза возможно при шаге приёма не более мощности самого тонкого слоя расчётной толщи. В частности, исследование описанного в работе скоростного разреза с $\Delta x_{пп} = 5$ м приводит к занижению оценки приращения интенсивности землетрясения за счёт грунтовых условий на 0,1 балла.

Выводы

Результаты обработки годографов первых вступлений показывают, что увеличение глубинности МПВ за счёт шага приёма приводит к недопустимо высокому искажению параметров модели скоростного закона. Шаг приёма системы наблюдений не должен превышать мощности самого тонкого слоя разреза, а переход к большей глубинности возможен за счёт повышения канальности станции, увеличения мощности и (или) числа накоплений при возбуждении волн.

Произведенные расчеты по методу сейсмических жесткостей для рассматриваемой модели демонстрируют допустимую погрешность в 0.1 балла при вычислении приращения сейсмической интенсивности. Вместе с тем не рассмотрен вопрос влияния погрешности в определении скорости поперечных волн и мощности слоев на результаты расчёта ожидаемых сейсмических воздействий, выполненных в специализированных программах (таких как NERA, Deepsoil, ProShake и др.). Этот вопрос требует отдельного изучения.

Литература

1. Алешин, А. С. Апология метода сейсмических жёсткостей / А. С. Алешин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2016. – № 3. – С. 13-21. – EDN VZBYDF.
2. Алешин, А. С. О достоинствах и недостатках классификации грунтов NEHRP / А. С. Алешин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2021. – № 1. – С. 10-31. – DOI 10.37153/2618-9283-2021-1-10-31. – EDN DQFZIV.
3. Концепция прогноза сейсмического состояния территорий развития криолитозоны / С. П. Серебренников, В. И. Джурик, Е. В. Брыжак, А. Ю. Ескин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 1. – С. 158-162. – EDN VVQMZF.
4. Кувалдин, А. В. Сейсморазведочные исследования при строительстве / А. В. Кувалдин, В. В. Романов, И. И. Рахматуллин // Профессиональное образование и общество. – 2014. – № 2(10). – С. 56-58. – EDN SFJFDJ.
5. Павленко, О. В. Современные методы оценки локальных эффектов землетрясений / О. В. Павленко // Физика Земли. – 2020. – № 5. – С. 59-69. – DOI 10.31857/S0002333720040067. – EDN ROODYI.
6. Пегин П.А., Филимонов Д.С. Особенности проектирования и строительства зданий в сейсмоопасных районах с многолетнемерзлыми грунтами // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. №4.
7. Порфирьев, Б. Н. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике / Б. Н. Порфирьев, Д. О. Елисеев, Д. А. Стрелецкий // Вестник Российской акаде-

мии наук. – 2019. – Т. 89, № 12. – С. 1228-1239. – DOI 10.31857/S0869-587389121228-1239. – EDN BWVJSZ.

8. Романов, В. В. Применение амплитудных графиков при обработке и интерпретации данных метода преломлённых волн для решения задач инженерной геологии / В. В. Романов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2012. – № 4. – С. 56-60. – EDN PBPEWR.

9. Романов, В. В. Применение инженерной сейсморазведки при изучении грунтовых вод в глинистых грунтах / В. В. Романов, Д. А. Гапонов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2014. – № 6(184). – С. 52-59. – EDN TGFXQR.

10. Романов, В. В. Влияние шага приёма на результаты метода преломлённых волн в инженерной сейсморазведке / В. В. Романов, М. Д. Кауркин, Д. О. Андреев // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2025. – № 3(86). – С. 90-93. – EDN ECXHTJ.

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