

## Опыт прослеживания отражающих границ на территории Московского региона

■ Романов В.В. РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва

*Аннотация: В пределах Московского региона метод отражённых волн в модификации общей средней точки применяется давно и успешно. Наибольшими возможностями по глубине и разрешению обладает метод отражённых волн на поперечных волнах, который позволяет прослеживать сейсмогеологические границы в широком диапазоне глубин относительно короткими расстановками. В статье рассмотрена эффективная методика полевых работ и обработки материалов, позволяющая в благоприятных условиях выделить до 4 отражающих горизонтов в пределах интервала глубин 5–100 м. Среди них — кровля меловых, юрских и каменноугольных отложений. Рассмотрены особенности распределения упругих свойств в сеймостратиграфических комплексах Московского региона, объясняющие причины появления устойчивых отражений в верхней части разреза.*

*Ключевые слова: инженерная сейсморазведка, метод отражённых волн, Московский регион, отражающие границы.*



### Введение

На территории Москвы, Московской области и Новой Москвы метод отражённых волн успешно применяется с начала 90 годов XX века. Первоначально применялись продольные волны[1], но достаточно быстро был осуществлён переход на поперечные волны. Особенностью горизонтально-поляризованных (SH) поперечных волн в частично-инверсных разрезах с приповерхностным высокоскоростным слоем (ПВС) является максимальное простое волновое поле, в котором нет поверхностных и обменных волн[13]. Выделение отражённых волн в интерва-

лах удалений, в нормальных скоростных разрезах занятых поверхностными волнами, позволило прослеживать изучать отражающие границы в широком диапазоне глубин достаточно короткими расстановками[17]. Кроме того, для низкоскоростных поперечных волн характерны меньшие длины волн и большие временные интервалы между отражениями на сейсмограммах и разрезах[20], то есть методы поперечных волн имеют большую разрешающую способность, чем методы, основанные на продольных волнах[8]. Немалую роль в этом играет слабая корреляция скорости поперечной волны и



водонасыщения пор пород[6]. Меньшая скорость поперечных волн благоприятно влияет на точность структурных построений[10]

Эффективность метода отражённых волн в Московском регионе предопределяет достаточно разнородная структура верхней части разреза, включающая породы различного возраста, существенно дифференцированные по упругим свойствам. Кроме того, большая часть поверхности геологической среды в регионе имеет плотное и мощное техногенное покрытие[18], а в холодное время года грунтовая толща промерзает сверху на 50–150 см, то есть частично–инверсные разрезы распространены здесь повсеместно [14]. Примечательно, что асфальтобетонное покрытие и сезонно–мёрзлый слой затрудняют выполнение практически всех методов электроразведки, традиционно лидирующей в инженерной геофизике[11].

Метод отражённых волн благодаря глубинности, разрешающей способности и помехоустойчивости[9] широко применяется для оценки карстово–суффозионной опасности, исследования оползневых процессов, уточнения геологического строения верхней части разреза[4].

В работе представлен опыт прослеживания отражающих горизонтов Московского региона - эта информация позволит оценить возможности сейсморазведки при включении её в комплекс инженерно-геофизических исследований и обоснованно выполнить проектирование полевых работ в конкретных сейсмогеологических условиях.

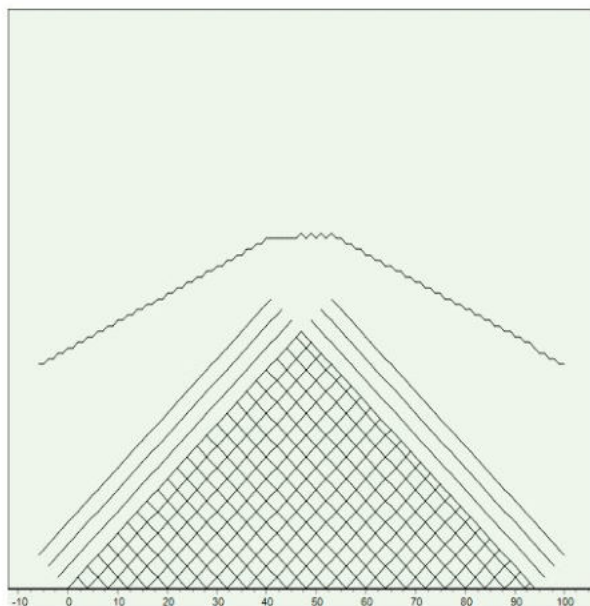
### **Применяемая технология полевых работ и обработки**

В процессе выполнения полевых работ автором применяется система наблюдений, основанная на перемещении пункта возбуждения относительно участка профиля с размещённой на нём неподвиж-

ной косой. При таком подходе в систему наблюдений включаются выносные, фланговые и центральные расстановки. После отработки всех запланированных расстановок осуществляется переход на следующий участок профиля с перекрытием кос. Автор предлагает называть такое профилирование томографическим, участок профиля с размещённым на нём сейсмоприёмниками — приёмной линией, систему из источника и приёмной линии — расстановкой, а множество расстановок с совпадающей приёмной линией — шаблоном. Шаблон, используемый в томографическом профилировании и включающий расстановки всех возможных типов, предлагается называть смешанным [5], количество одновременно подключаемых приёмников — порядком приёмной линии.

Если длина профиля равна длине приёмной линии, то выносные расстановки создаются на левом и правом флангах, если профиль выполняется с переносом приёмной линии, то выносные расстановки создаются только на конце и в начале профиля. Шаг возбуждения выбирается равным удвоенному шагу приёма, что позволяет достичь максимальной кратности перекрытия, равной половине порядка приёмной линии. Количество выносов и перекрытие линий при переходе на новый участок профиля выбирается исходя из желаемой кратности на концах приёмных линий. Так, если минимальная кратность задаётся равной 6, то количество выносных расстановок на одном фланге линии должно быть равно 5, а перекрытие приёмных линий — 5 шагов возбуждения, чем больше шаг возбуждения, тем больше степень перекрытия линий на профиле [7]. Кроме того, включение выносов в систему наблюдений и перекрытие смежных приёмных линий приводит к выравниванию распределения





▲ Рис. 1. Один из шаблонов томографической системы наблюдений на обобщённой плоскости и карта кратности по нему.

кратности в центральных частях линий. Рассмотренная система наблюдений на обобщённой плоскости изображена на рисунке 1.

Профили сейсморазведки располагались так, чтобы они полностью находились на приповерхностном высокоскоростном слое. Для работы использовалась спаренная 24-канальная станция, шаг приёма при исследовании глубин до 30 м равнялся 1 м, при переходе на большие глубины он увеличивался до 2 м [2]. Применялась схема наблюдений Y–Y, горизонтальные приёмники устанавливались в предварительно просверленные перфоратором отверстия, возбуждение реализовывалось касательным ударным воздействием бойка кувалды непосредственно по твёрдому покрытию или промёрзшей поверхности грунта. Масса кувалды — 5–8 кг, удары производились с двух противоположных направлений, с каждого из них выполнялось по 5–10 накоплений. Применялись шаг дискретизации 0,5 мс и длина записи 768 мс. На полевых сейсмограммах в первых

вступлениях прослеживалась высокоскоростная прямая волна, в последующих — несколько полезных отражений и кратные волны. Прямая волна имела скорость 1500–2000 м/с, эффективные скорости отражённых волн изменялись в пределах от 200 до 400 м/с (Рисунок 2).

Получаемые данные обрабатывались по стандартному графу МОВ–ОСТ[15]. Предварительная обработка включала следующие процедуры:

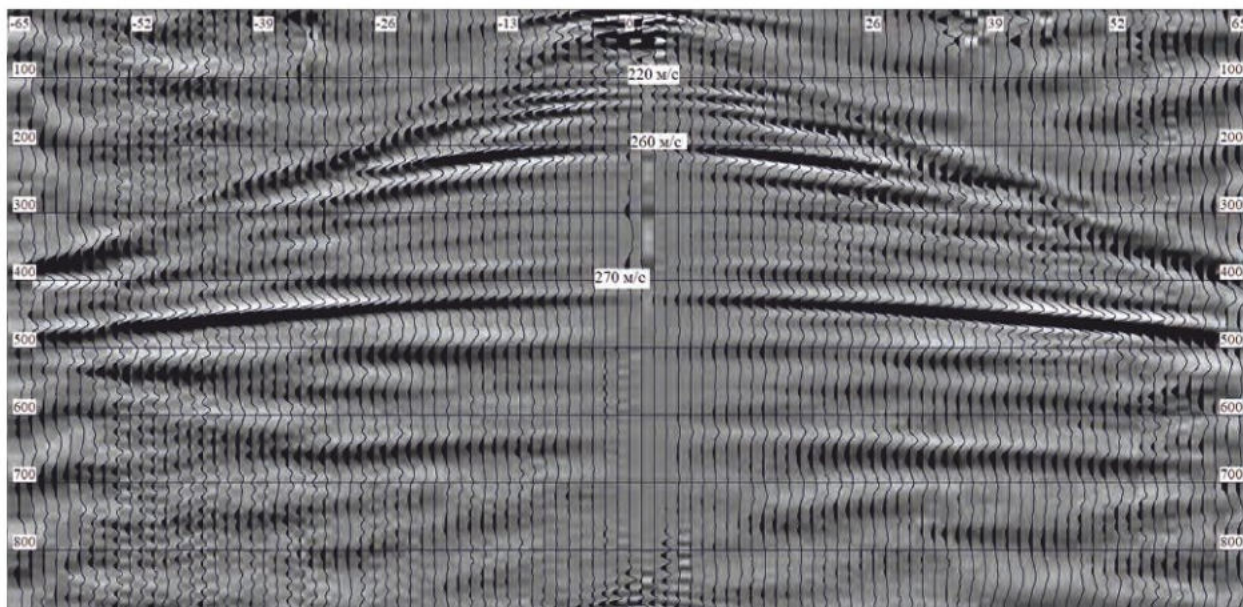
- 1) Монтаж сейсмограмм с отбраковкой реализаций;
- 2) Вертикальное суммирование накоплений;
- 3) Вычитание сейсмограмм, полученных при противоположно направленных воздействиях;
- 4) Редакция трасс;
- 5) Ввод геометрии в заголовки трасс.

Основная обработка выполнялась следующей последовательностью процедур:

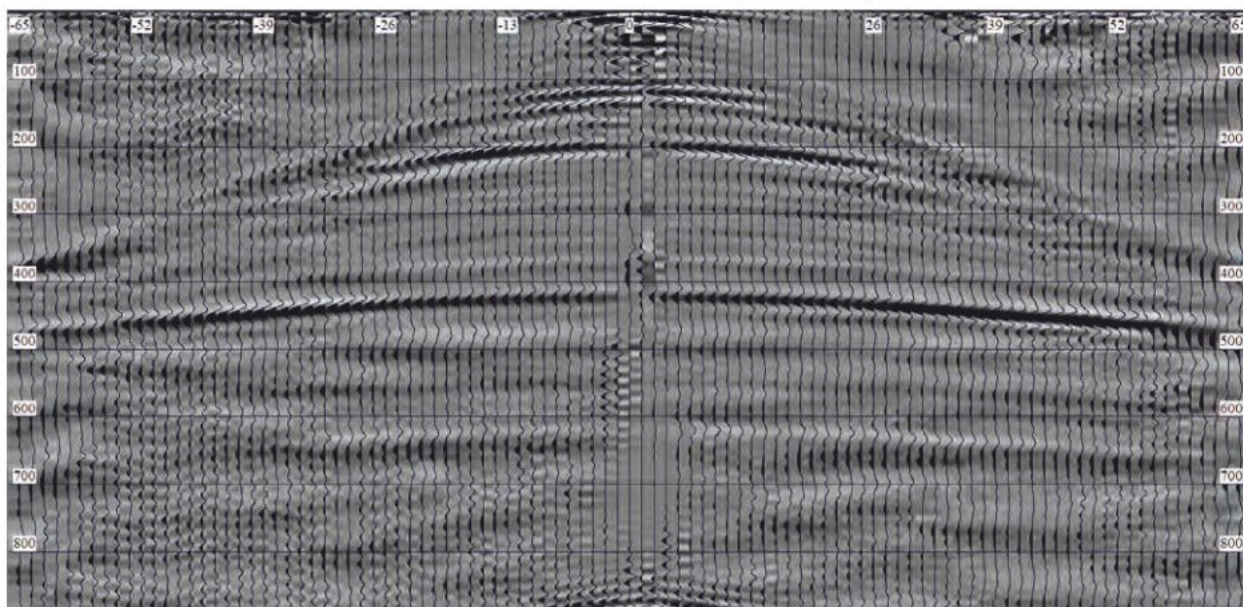
- 1) Сортировка трасс по ОСТ;
- 2) Автоматическая регулировка амплитуд в окне 200 мс;
- 3) Частотная фильтрация с полосой пропускания 10–60 Гц и шириной верхнего и нижнего срезов — 10 Гц;
- 4) Предсказывающая деконволюция с длиной оператора 120 мс, интервалом предсказания 1 мс, стабилизирующим коэффициентом 15% (Рисунок 3);
- 5) Скоростной анализ;
- 6) Ввод кинематических поправок, учитывающий высокий вертикальный градиент скорости и негиперболичность годографа[19];
- 7) Верхний мьютинг[16];
- 8) Суммирование по ОСТ;
- 9) Миграция по Кирхгофу.

На глубинных разрезах выделялись отражающие горизонты и качественно





▲ Рис. 2. Супер-сейсмограмма МОВ с нанесёнными значениями эффективных скоростей однократных отражённых волн. По вертикали — время, мс, по горизонтали — удаление, м.



▲ Рис. 3. Результат применения минимально-фазовой предсказывающей деконволюции. По вертикали — время, мс, по горизонтали — удаление, м.

оценивалось состояние пород в слоях между ними. Было отмечено, что количество отражающих границ в верхней части разреза Московского региона невелико — это кровли каменноугольных известняков, юрских глин[12], редко — меловых песков. Далее будут рассмотрены основные закономерности в распределении отражающих горизонтов в регионе.

### Основные сейсмостратиграфические комплексы Московского региона

Верхняя часть разреза в различных районах Москвы может включать себя от двух до четырёх сейсмостратиграфических комплексов:

- 1) Суглинки, пески, супеси и глины четвертичного возраста;
- 2) Пески и глины отложения мела;
- 3) Глины и пески юры;

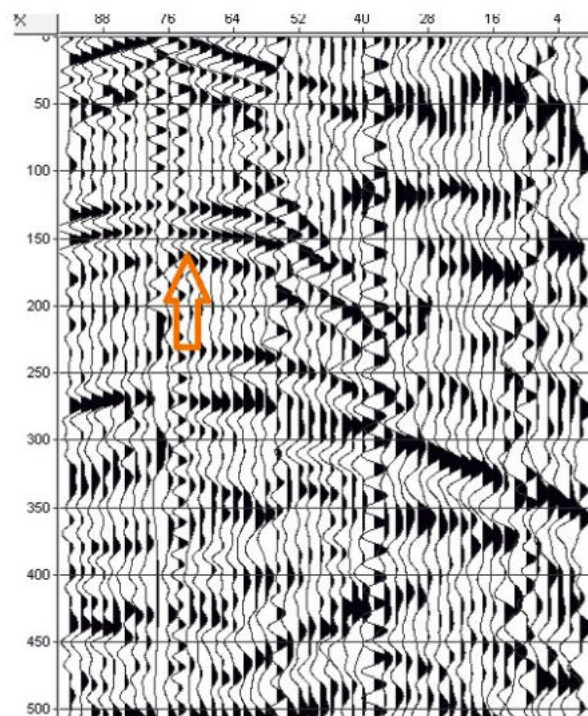


4) Известняки, доломиты, глины и мергели карбона.

Каждый из комплексов обладает своим распределением упругих свойств, а границы комплексов при благоприятных условиях становятся отражающими или преломляющими, поэтому их следует считать сейсмостратиграфическими комплексами.

Четвертичный комплекс представлен породами различного литологического состава. Как правило, первым слоем комплекса являются породы со скоростью поперечных волн  $V_s = 160\text{--}180$  м/с, далее скорости сейсмических волн растут до  $200\text{--}350$  м/с, преимущественно плавно, без образования резких скоростных и отражающих границ. Среднее значение скорости поперечных волн в четвертичных породах  $V_s = 250$  м/с. В приповерхностном высокоскоростном слое естественного или техногенного происхождения скорость поперечных волн увеличивается до  $1500\text{--}2000$  м/с, а нормальный скоростной разрез сменяется на частично-инверсный. Устойчивые отражения для четвертичного комплекса нехарактерны.

Меловой комплекс распространён в Московском регионе не повсеместно, в основном он приурочен к локальным водораздельным поднятиям. Наличие меловых отложений обычно указывает на значительную глубину нижележащих юрских и карбонатных пород (Рисунок 4). Если применяются поперечные волны, то отражения от кровли меловых отложений и внутри их толщи обычно не прослеживаются, так как различие упругих свойств четвертичных и меловых пород, а также у различных стратиграфических подразделений мела, невелико. Скорости волн в меловых отложениях изменяются не в столь широких пределах, как в четвертичных, среднее значение  $V_s = 350$  м/с. Для исследования отражающих границ в мощной толще меловых песков

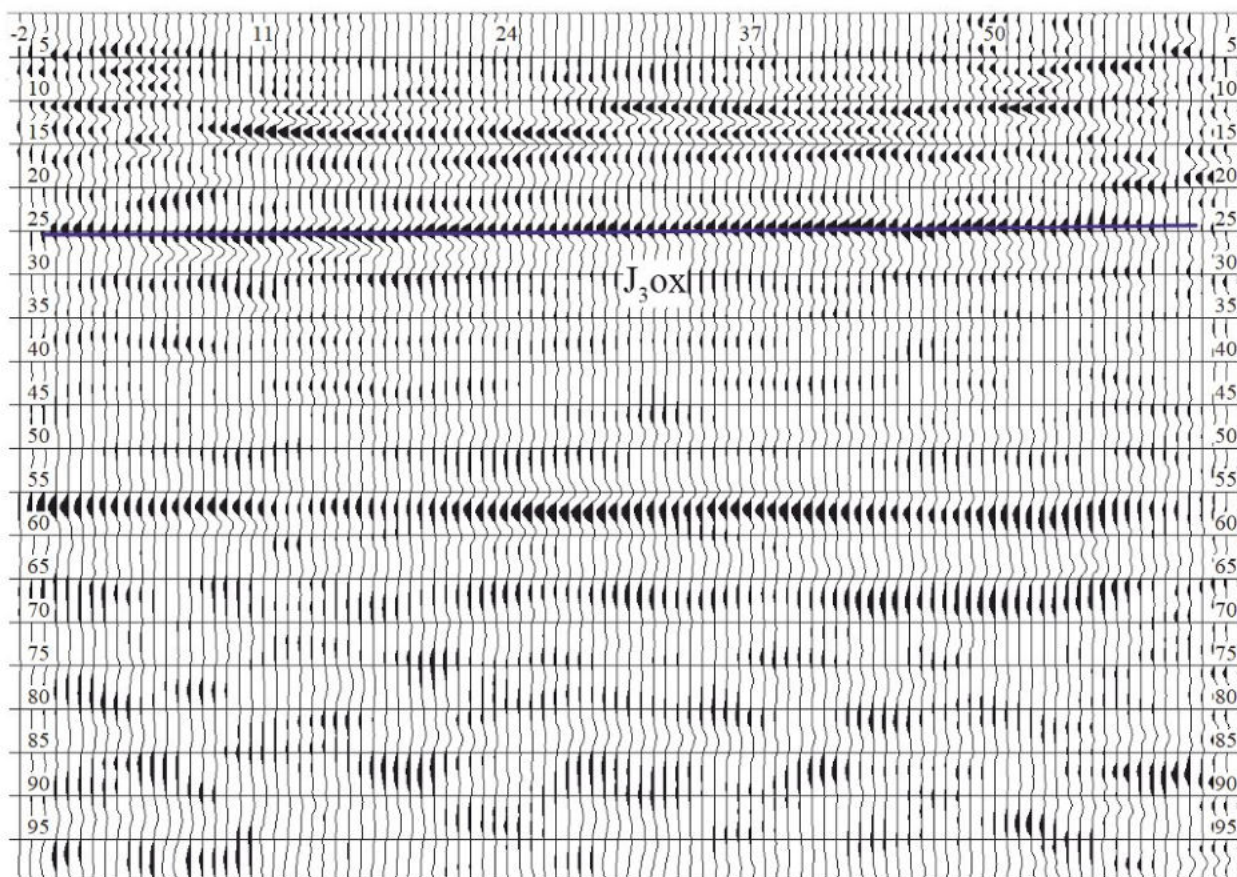


▲ Рис. 4. Интерференция двух отражённых волн, образованных в кровле мела и юры. По вертикали — время, мс, по горизонтали — удаление, м.

и глин предпочтительнее продольные волны, дополнительная скоростная дифференция в этом случае появляется, если целевая граница разделяет породы с разным водонасыщением.

**Юрский комплекс** широко представлен в Московском регионе, за исключением современных и древних речных долин. Чаще всего юра представлена характерными чёрными глинами оксфордского и киммериджского ярусов, реже — волжского и келловейского ярусов. Средняя скорость в юрских отложениях такая же, как и в меловых  $V_s = 350$  м/с, однако для оксфордских глин характерны пониженные плотность и скорость поперечных волн, что делает их кровлю устойчивой и динамически выраженной отражающей границей (Рисунок 5). Так как юрские породы часто характеризуются пониженной акустической жесткостью, отражения от их кровли имеют обратную полярность по сравнению с другими горизонтами.





▲ Рис. 5. Глубинный динамический разрез МОВ–ОСТ с выделенной кровлей юры.  
По вертикали — глубина, м, по горизонтали — координаты пунктов профиля, м.

**Каменноугольный комплекс** представлен на территории Москвы тремя ярусами — гжельским, касимовским и московским. Среди пород преобладают карбонаты (известняки или доломиты), глины и мергели. Карбонатные породы часто закарстованы или перекрыты слоем элювия. Кровля первого пласта известняков или доломитов обычно формирует устойчивое интенсивное отражение (Рисунок 6) на поперечных волнах, внутри же глинисто-карбонатной толщи отражения выделяются редко, за них обычно ошибочно принимают кратные волны. Менее интенсивные отражённые волны формируются на кровле мергелей или элювия карбонатных пород. Средняя скорость поперечных волн в породах каменноугольного комплекса  $V_s = 800$  м/с, в карбонатных породах комплекса  $V_s = 1000$  м/с, в глинах и мергелях  $V_s = 600$  м/с, вся каменноугольная толща

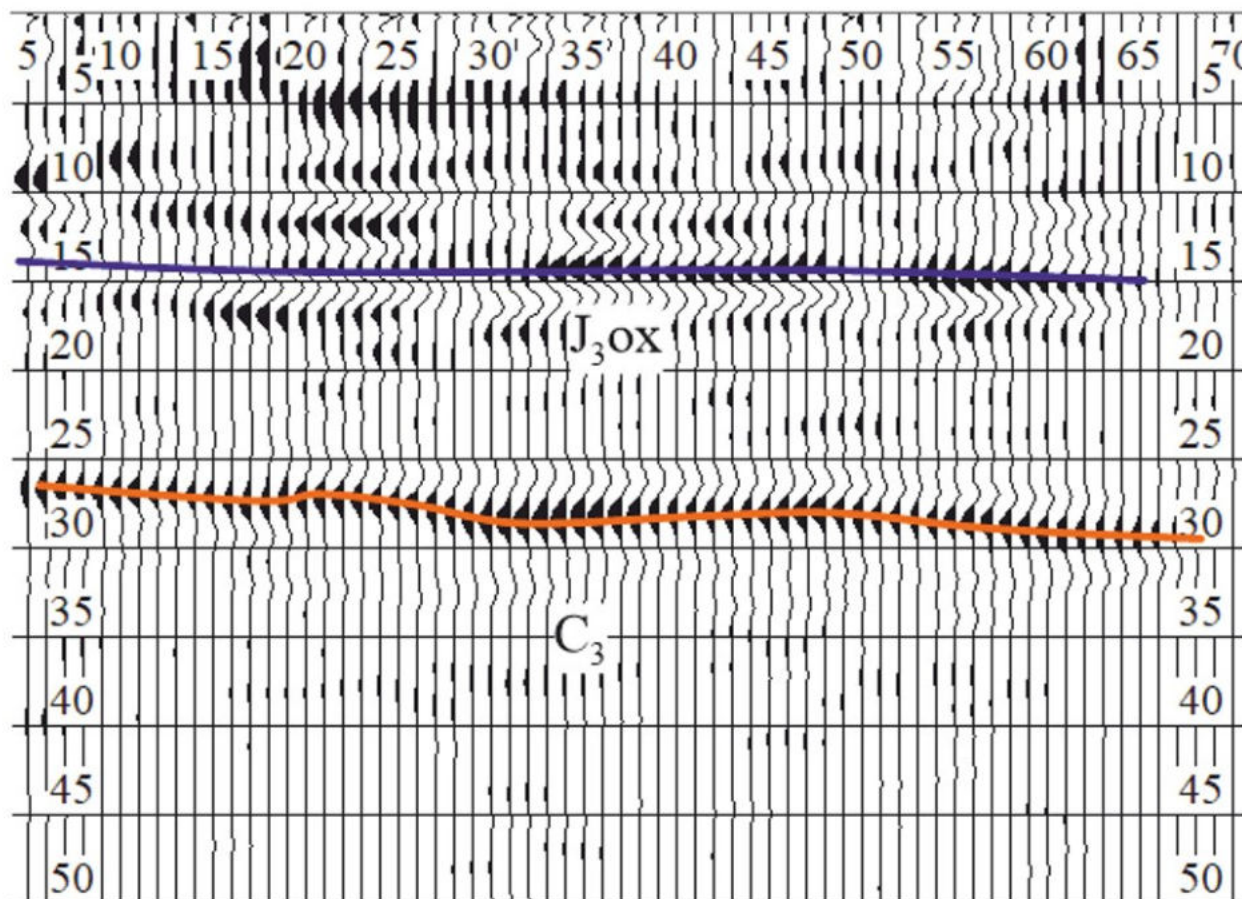
является высокоскоростной. При значительном развитии карстового процесса скорости и амплитуды отражений в карбонатных породах снижаются, наблюдаются дифрагированные волны.

В общем, реперные отражения в Московском регионе обычно наблюдаются на поперечных волнах, и они не привязаны к конкретным геологическим границам, а совпадают с кровлей первых от поверхности коренных пород (юрских или каменноугольных).

### Выводы

На основании изложенного выше материала можно заключить, что при работе в Московском регионе на поперечных отражённых волнах в условиях частично-инверсных разрезов с приповерхностным высокоскоростным слоем, в роли реперных отражений чаще всего выступают кровли юрских и(или) камен-





▲ Рис. 6. Глубинный динамический разрез МОВ–ОСТ с выделенными кровлями юры и карбона. По вертикали — глубина, м, по горизонтали — координаты пунктов профиля, м.

ноугольных пород. Именно для этих отложений характерна наибольшая дифференция по акустической жёсткости и выдержанность упругих свойств в вертикальном направлении и по латерали.

### Литература

1. Боганик Г.Н., Номоконов В.П. Выявление карстовых образований высокоразрешающей сейсморазведкой МОВ // Геофизика. 1994. № 2. С. 52-53.
2. Ли В. О., Владов М. Л. Анализ эффективности 2D сейсморазведки методом ОГТ при изучении приповерхностной части разреза // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2012. – № 3.
3. Романов В.В. Интерпретация сейсмической томографии на примере изучения геологического строения опол-

зневоего склона // Разведка и охрана недр. 2015. № 3. С. 34-37.

4. Романов В.В. Из опыта комплексного применения сейсморазведки и георадиолокации при инженерно-геологических изысканиях на территории Москвы // Инженерные изыскания. 2015. № 5-6. С. 44-49.

5. Романов В. В. Анализ развития терминологической базы методики двумерной сейсморазведки и предложения по её развитию и унификации // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2022. № 1. С. 61-74.

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



7. Романов В. В., Кауркин М. Д., Иванов А. А. Анализ параметров систем наблюдений с перекрытием в инженерной сейсморазведке // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2022. — № 3 (74). — С. 67-78.

8. Романов В.В., Мальский К.С. Анализ возможностей изучения гидрогеологического режима карьеров и подземных горных выработок инженерной сейсморазведкой // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 6. С. 74-78.

9. Романов В.В., Посеренин А.И., Дронов А.Н., Мальский К.С. Обзор геофизических методов, применимых при поиске геомеханических нарушений вблизи горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2016. № 1. С. 243-248.

10. Романов В.В., Посеренин А.И., Мальский К.С. Метрология, стандартизация и сертификация // Учебное пособие / Москва, 2015.

11. Романов В.В., Рахматуллин И.И. Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений Дмитровского района Подмосковья // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2014. № 3. С. 86-88.

12. Романов В.В., Шнеерсон М.Б. Инженерная сейсморазведка методом отражённых волн в Москве // Геофизика. 2018. № 6. С. 75-81.

13. Скворцов А.Г., Дроздов Д.С. Опыт использования высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных SH-волнах для изучения инженерно-геологических условий на территории Москвы. // Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий. — Екатеринбург: Изд-во Аква-Пресс, 2001. — С. 177-183.

14. Скворцов А. Г., Царев А. М. Слой сезонного промерзания—геокриологический ресурс повышения эффектив-

ности малоуглубинной сейсморазведки // Приоритетные направления в изучении криосферы Земли.—Пущино. — 2005. — С. 140.

15. Baker G. S. Processing near-surface seismic-reflection data: A primer. — SEG Books, 1999.

16. Baker G. S., Steeples D. W., Drake M. Muting the noise cone in near-surface reflection data: An example from southeastern Kansas // Geophysics. — 1998. — Т. 63. — №. 4. — С. 1332-1338.

17. Liu J. P. et al. Progress and application of near-surface reflection and refraction method // Chinese Journal of Geophysics. — 2015. — Т. 58. — №. 9. — С. 3286-3305.

18. Krawczyk C. M., Polom U., Beilecke T. Shear-wave reflection seismics as a valuable tool for near-surface urban applications // The Leading Edge. — 2013. — Т. 32. — №. 3. — С. 256-263.

19. Miller, R. D., & Xia, J. (1998). Large near-surface velocity gradients on shallow seismic reflection data. GEOPHYSICS, 63(4), 1348–1356. doi:10.1190/1.1444436

20. Wadas S. H., Polom U., Krawczyk C. M. High-resolution shear-wave seismic reflection as a tool to image near-surface subsurface structures—a case study in Bad Frankenhausen, Germany // Solid Earth. — 2016. — Т. 7. — №. 5. — С. 1491-1508.

## Подробнее об авторе



Романов  
Виктор Валерьевич

РГУ нефти и газа (НИУ)  
имени И.М. Губкина,  
кандидат технических  
наук, доцент