

УДК 550.834

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГРУНТОВЫХ ВОД В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

© 2014 г. В.В. Романов, Д.А. Гапонов

Романов Виктор Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра геофизики, Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, ул. Миклухо-Маклая, 23, г. Москва, 117997, e-mail: roman\_off@mail.ru.

Romanov Viktor Valerievich – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Geophysics, Russian State Geological Prospecting University, Miklukho-Maklay St., 23, Moscow, 117997, Russia, e-mail: roman\_off@mail.ru.

Гапонов Дмитрий Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, старший преподаватель, кафедра геоэкологии и прикладной геохимии, Институт наук о Земле Южного федерального университета, ул. Зорге, 40, г. Ростов н/Д, 344090, e-mail: geophysics@land.ru.

Gaponov Dmitry Aleksandrovich – Candidate of Geological and Mineralogical Science, Senior Lecturer, Department of Geoecology and Applied Geochemistry, Institute of Earth Sciences of the Southern Federal University, Zorge St., 40, Rostov-on-Don, 344090, Russia, e-mail: geophysics@land.ru.

Анализируются возможности и трудности при проведении инженерной сейсмозондировки с целью поиска грунтовых вод в глинистых грунтах. Рассматриваются предпосылки использования сейсмических методов по расчленению зоны аэрации и водоносных грунтов, анализируются модели распределения упругих свойств для решения поставленной задачи, основы методики проведения полевых работ, алгоритмов обработки и интерпретации данных. Полученные выводы могут быть использованы для уточнения положения уровня грунтовых вод в сходных инженерно-геологических условиях.

**Ключевые слова:** инженерная сейсмозондировка, глинистые грунты, грунтовые воды, преломленные волны, градиентные среды, продольные волны, поперечные волны.

*In this article, we analyze the possibilities and challenges of application of seismic surveys for the purposes of groundwater exploration in clayey soils. We consider premises for use of seismic methods for stratification of aeration zone and water-bearing soils, analyze models of distribution of elastic properties for the given task solution, fundamentals of field work methodology, and algorithms of data processing and interpretation. The conclusions can be employed for detalization of position of groundwater level in comparable engineering-geological conditions.*

**Keywords:** engineering seismic survey, clayey soils, groundwater, reflected waves, gradient environments, primary waves, shear waves.

Грунтовые воды являются первым от поверхности безнапорным водоносным горизонтом, который питается за счёт просачивания (инfiltrации) атмосферных осадков, и имеют большое значение в водоснабжении населения, промышленности и разработке месторождений из-за низкой стоимости добычи. Грунтовые воды наименее защищены от химических и бактериологических загрязнений, поэтому охрана их закреплена в законодательстве Российской Федерации (Водный кодекс РФ). С другой стороны, движение грунтовых вод провоцирует карстово-суффозионные процессы, вызывает подтопление

подземных сооружений и активизацию оползней, приводит к заболачиванию подошв карьеров при разгрузке вод в откосах (рис. 1) [1].

Нижней границей грунтовых вод служит первый региональный водоупор, а поверхность образует зеркало, или уровень грунтовых вод (УГВ). Над ним залегает зона аэрации, поры грунтов которой содержат определённое количество воздуха. Грунтовые воды по многочисленным вертикальным каналам (капиллярам) поднимаются вверх, увлажняя породы зоны аэрации. Высота капиллярного поднятия возрастает в зависимости от среднего размера частиц грунта.



Рис. 1. Разгрузка грунтовых вод, залегающих в толще моренных четвертичных суглинков. Микроскопическое «русло» водного потока отмечено стрелкой

Глинистые грунты содержат от 1 % глинистых частиц (г.ч.) преимущественно чешуйчатой формы и размером менее 5 мкм. Простейшая классификация глинистых грунтов основана на относительном содержании г.ч.

По этой классификации глинистые грунты разделяются на глины (более 30 % г.ч.), суглинки (10 ÷ 30 % г.ч.) и супеси (1 ÷ 3 % г.ч.). Из-за малого размера частиц глинистые грунты способны удерживать воду и имеют значительную высоту капиллярного поднятия, до 12 м у лёгких глин. Однако полное водонасыщение в капиллярной кайме наблюдается только в самой нижней её части, в интервале 1,5 – 2,0 м над уровнем свободной поверхности грунтовых вод. Выше по разрезу вода адсорбируется глинистыми частицами, что препятствует её дальнейшему капиллярному поднятию [2].

Высокая пористость частиц глинистых грунтов вызывает их значительное уплотнение с глубиной. Глинистые грунты типичны для верхней части геологического разреза Российской Федерации. Глины, суглинки и супеси образуются при движении и деградации ледников, разрушении скальных горных пород под влиянием выветривания, в морских условиях, в развивающихся проявлениях карстового процесса.

По способности пропускать воду глинистые грунты входят в группы слабопроницаемых, весьма слабопроницаемых и практически непроницаемых грунтов. Коэффициент фильтрации глинистых грунтов изменяется от 500 до 0,05 мм/сут. Среди глинистых грунтов грунтовые воды чаще всего распространены в лёссах и лессовидных суглинках, обладающих макропористостью. Сквашность таких грунтов обусловлена неоднородным гранулометрическим составом, морозным выветриванием, воздействием корней деревьев и травяного покрова. Кроме собственно грунтовых вод, в глинистых грунтах зоны аэрации формируется и сезонная верховодка, возникающая из-за малой скорости инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод [3].

Сейсморазведка представляет обширный раздел разведочной геофизики и использует для исследования геологического строения Земли искусственно возбуждаемые упругие волны. Инженерное направление в сейсморазведке отличается небольшой глубиной исследования, применением слабых источников упругих волн и портативной малоканальной аппаратуры [4]. В качестве источников волн применяются ударные воздействия. В зависимости от направления удара в грунтах формируются фронты продольной и (или) поперечной волн [2].

Продольные волны (Primary Waves) связаны с колебательными движениями частиц вдоль направления распространения волны, а поперечные (Shear Waves) – перпендикулярно ему. Продольные волны способны распространяться в жидкостях и газах, поэтому их скорость зависит от влажности грунта. В полностью водонасыщенных грунтах скорость распространения продольных волн резко увеличивается до уровня 1500 м/с и больше (указанное значение соответствует скорости звука в воде). Для поперечных волн УГВ акустически прозрачен, так как поперечные волны существуют только в твёрдой фазе грунта. Поперечные волны связаны со сдвиговыми деформациями, по отношению к которым жидкости и газы абсолютно неупруги, поэтому наличие любого количества воды в пустотах глинистого грунта практически не оказывает влияния на скорость поперечных волн [5].

Из-за значительного возрастания скорости на УГВ формируются продольные волны, скользящие вдоль него со скоростью подстилающей среды и преломляющиеся в зону аэрации. Сейсморазведка методами продольных преломлённых волн позволяет найти положение УГВ в разрезе с шагом по профилю 1 – 2 м, что намного превышает возможности экономически обоснованного разведочного бурения. Принципиального различия в выделении поверхности верховодки и УГВ сейсмическими методами нет, поэтому далее по тексту рассматриваются только грунтовые воды.

В данной статье обобщается практический опыт изучения гидрогеологических условий в регионах с преобладанием глинистых грунтов при помощи методов инженерной сейсморазведки. На практических примерах показано, какие проблемы возникают у сейсморазведчика при поиске грунтовых вод в глинистых грунтах и пути их решения.

### **Технология выполнения сейсморазведки при прослеживании УГВ**

Наиболее экономичным и быстрым способом изучения уровня грунтовых вод на объектах значительной площади или протяжённости является наземное сейсморазведочное профилирование. При помощи профилирования целевые геолого-геофизические границы непрерывно прослеживаются вдоль заданных прямых направлений (профилей), что отражается на разрезах и картах. Для проведения сейсморазведки

применяется комплект оборудования, состоящий из ударного источника, сейсмических датчиков и переносной измерительной лаборатории – сейсмостанции [6].

Для возбуждения упругих волн в инженерной сейсморазведке применяются ручные механические источники импульсного типа, реализуемые ударами кувалдой по расположенной на поверхности земли металлической подложке. Вдоль линии профиля размещаются расстановки из нескольких десятков сейсмических приёмников, которые воспринимают механические колебания упругих волн и преобразуют их в электрические сигналы. Информация со всех приёмников расстановки по кабелю передаётся на сейсмостанцию, где она после предварительной обработки сохраняется в виде сейсмограмм – последовательности графиков колебаний, построенных в порядке увеличения расстояния между источником и приёмником (удаления) или координаты приёмника на профиле.

Вступление фронта упругой волны выделяется на графике колебаний, зафиксированных сейсмическим приёмником как короткий периодический затухающий сигнал – импульс. Импульсы одной волны на сейсмограмме формируют прямолинейные или гладкие криволинейные оси синфазности – линии, проведённые по некоторой фазе импульса – максимуму или минимуму.

Наиболее просто выделяются волны в первых вступлениях, приходящие на приёмники раньше остальных. Такие волны наблюдаются на фоне относительно слабых случайных колебаний и не интерферируют с другими волнами (рис. 2). Зачастую время вступления волн первых вступлений – единственная реально используемая информация, извлекаемая из сейсмограмм инженерной сейсморазведки [7].

Прослеженные оси синфазности строятся на графике время – расстояние, называемом годографом волны, которые применяются для вычисления скорости упругих волн в грунтах и глубины сейсмических границ. На каждой расстановке стремятся получить систему из максимального количества годографов выбранных волн для наиболее точной оценки формы и глубины границы. Встречные годографы формируются размещением источника на левом и правом флангах расстановки, нагоняющие – только по одну сторону расстановки (рис. 3). Система из встречных и нагоняющих годографов обеспечивает непрерывность прослеживания границ и точное определение скорости.

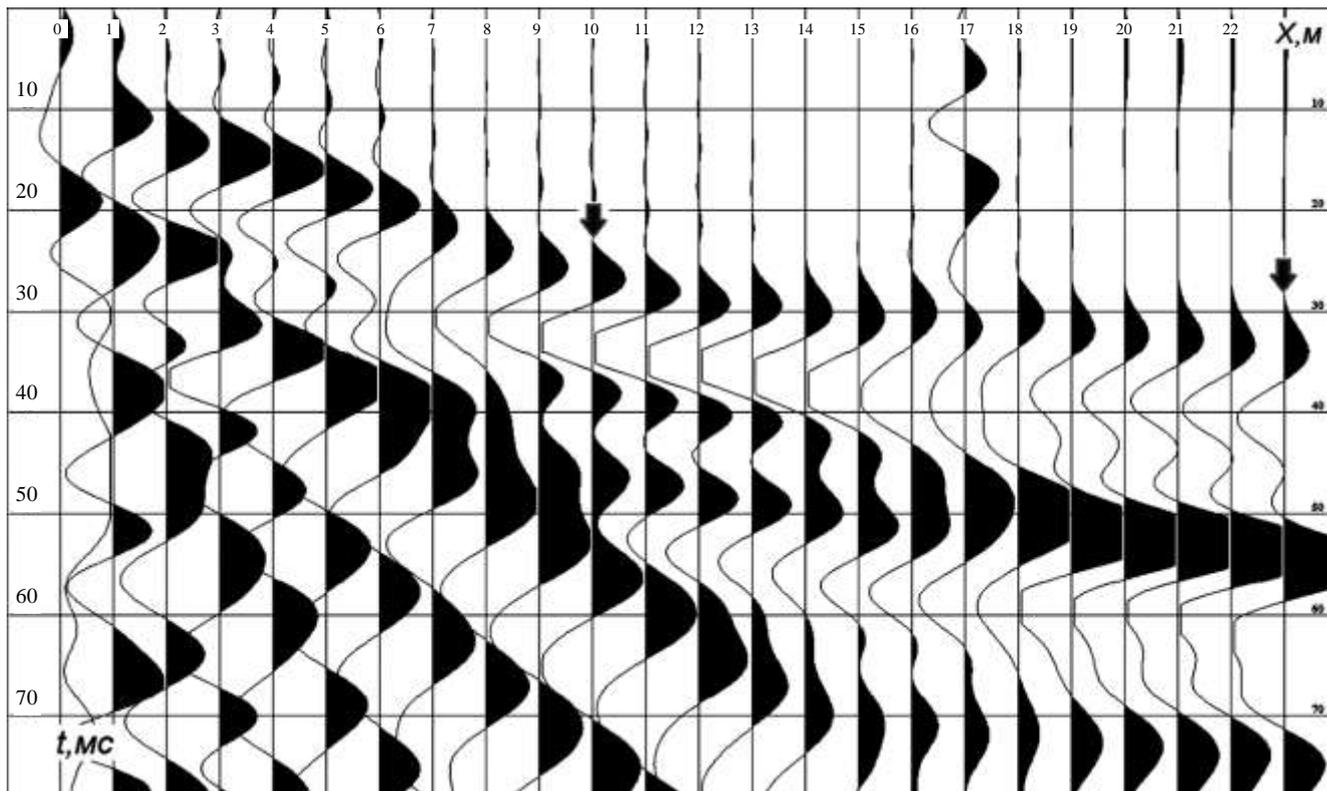


Рис. 2. Сейсмограмма инженерной сейсморазведки. По горизонтальной оси отложены значения удаления, по вертикальной – время записи колебаний. Стрелками показана ось синфазности волны

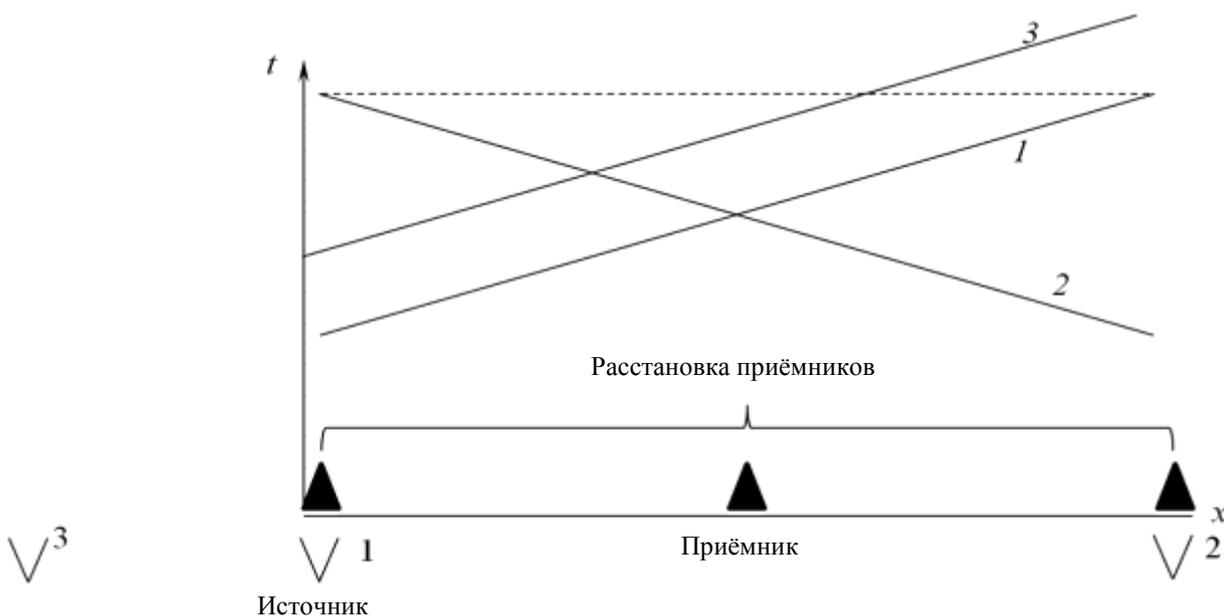


Рис. 3. Схема получения системы из встречных (1, 2) и нагоняющих (1, 3) годографов

Последующая обработка и интерпретация полученных сейсмических данных определяется выбранной моделью – упрощенным представлением о геологическом строении разреза. До последнего времени в инженерной сейсморазведке преоблада-

ло представление о верхней части разреза как о последовательности из нескольких горизонтальных слоёв с постоянной мощностью и скоростью упругих волн. При определении УГВ таких слоёв в модели всего два – зона аэрации и полностью на-

сыщенные водой грунты под ней. Для полного описания простейшей двухслойной модели достаточно указать мощность верхнего слоя, а также задать скорости первого и второго слоёв.

Описанная модель предусматривает наличие в первых вступлениях двух волн с абсолютно прямолинейными осями синфазности. Вблизи источника в первые вступления выходит прямая волна, распространяющаяся со скоростью первого слоя от источника к приёмнику по кратчайшему пути – прямой линии. Из-за меньшей скорости годограф прямой волны имеет больший наклон, и она достаточно быстро «уходит» в последующие вступления. На некотором удалении, зависящем от глубины УГВ и отношения скоростей первого и второго слоёв, в первые вступления выходит преломлённая волна с более пологим годографом. Волны первых вступлений создают единый годограф первых волн, имеющий вид ломаной линии, состоящей из двух отрезков и одной точки излома (рис. 2). Наличие такой точки на сейсмограмме продольных волн качественно указывает на наличие грунтовых вод в пределах одной трети от максимального удаления расстановки. На сейсмограммах поперечных волн точка излома годографа первых вступлений отсутствует, так как нет условий для возникновения преломлённых волн. Рассмотренный подход обеспечивает достаточно точное нахождение УГВ в песчаных и крупнообломочных грунтах, однако для глинистых грунтов более адекватна модель непрерывного плавного изменения скорости с глубиной [4].

Многочисленные ошибки, выявленные при сравнении глубин УГВ, полученных сейсморазведкой и разведочным бурением, указывают на несостоятельность устоявшихся представлений о влиянии грунтовых вод на физические свойства глинистых грунтов. Грунтовые воды в глинистых грунтах не имеют резко очерченной свободной поверхности, а по системе капилляров проникают в зону аэрации, порой достигая поверхности земли. Упругие свойства грунтов слабо зависят от типа подземной воды, поэтому преломляющая граница приурочена не к УГВ, а к поверхности капиллярной каймы, которая может располагаться на несколько метров выше устоявшегося зеркала грунтовых вод.

Кроме того, уровень грунтовых вод не является геологической границей, положение которой относительно стабильно в течение длительного времени. Положение УГВ и связанной с ним капиллярной каймы зависит от времени года и количества выпадающих атмосферных осадков.

Интерпретация сейсмических преломляющих границ, предположительно связанных с УГВ, затрудняется тем, что преломлённые волны также образуются на кровле скальных и мёрзлых грунтов. Например, скорость продольных волн в так называемой вялой мерзлоте практически не отличается от значений в грунтах, содержащих воду в жидком состоянии [4].

Для глинистых грунтов характерно плавное (градиентное) увеличение значений физико-механических и водно-физических свойств с глубиной, вызванное уплотнением пористой структуры грунта и возрастанием влажности по мере приближения к УГВ. В средах с непрерывным изменением упругих свойств на сейсмических границах изменяется не сама скорость, а её первая производная. Наиболее просто описываются слои с линейным градиентом скорости

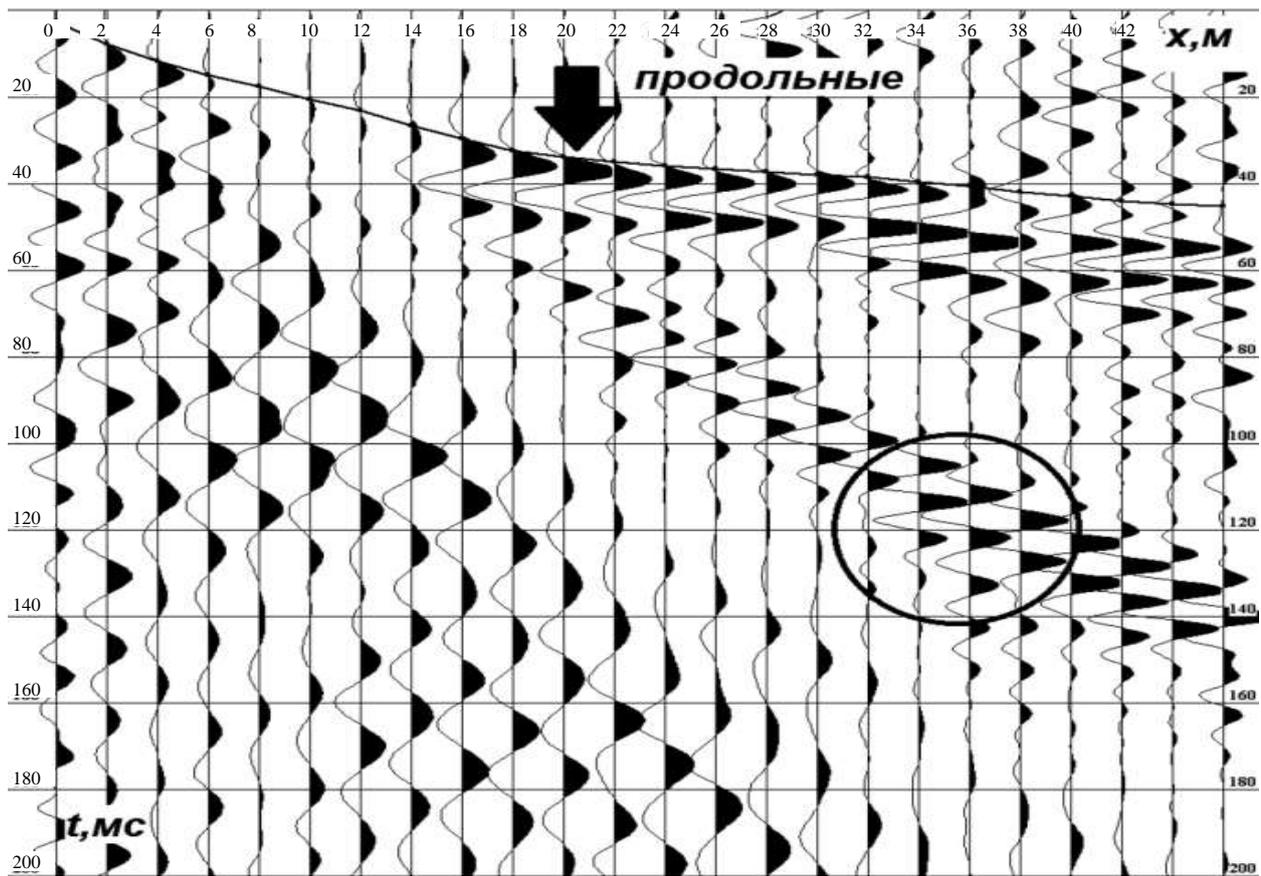
$$V(z) = V_0 + \alpha z = V_0(1 + \beta z), \quad \alpha = \frac{\Delta V}{\Delta z}, \quad \beta = \frac{\alpha}{V_0}, \quad (1)$$

где  $V(z)$  – определяемая скорость;  $z$  – расстояние по нормали от кровли градиентного слоя до точки, где определяется скорость;  $V_0$  – скорость в кровле градиентного слоя;  $\alpha$ , 1/с, – абсолютный градиент скорости;  $\beta$ , 1/м, – относительный градиент скорости.

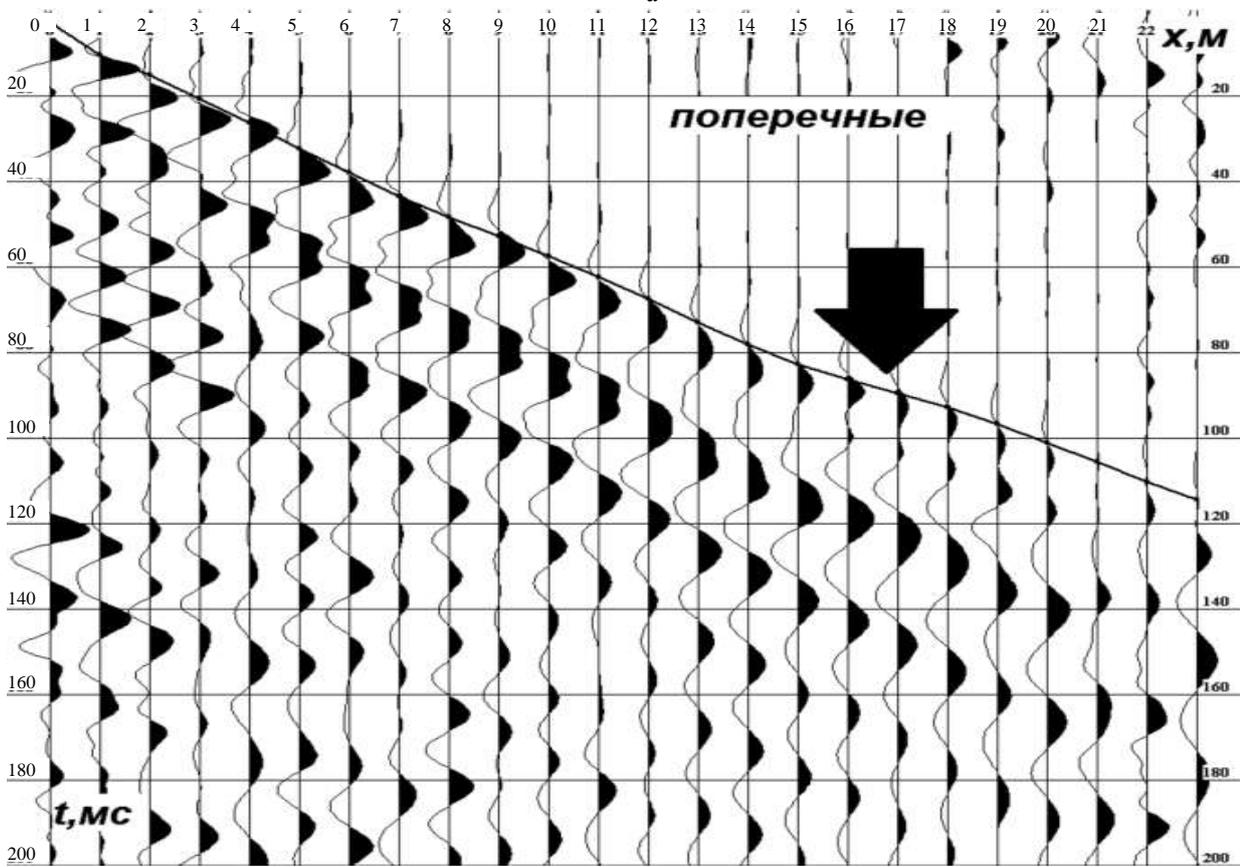
По упомянутым ранее причинам сейсмические свойства глинистых грунтов носят ярко выраженный градиентный характер. Лучи сейсмических волн в таких условиях искривляются (рефрагируют) и возвращаются на поверхность. Глубина проникновения рефрагированной волны определяется малостью угла её луча. На малых удалениях лучи рефрагированной волны практически горизонтальны и неспособны проникнуть на значительную глубину. С возрастанием угла луча увеличивается и глубина проникновения, а волна выделяется на большом расстоянии от источника [2].

Годограф рефрагированной волны имеет форму выпуклой кривой с постоянно уменьшающейся крутизной. Его обработка заключается в получении закона распределения скорости с глубиной. Далее кривая изменения скорости разбивается на несколько слоёв с относительно постоянным градиентом скорости, что позволяет определить глубины сейсмических нерезких границ. Более удобным является нахождение относительного градиента  $\beta$ , так как он не привязан к скорости в кровле слоя.

На рис. 4 показаны типичные сейсмограммы с записью продольных и поперечных волн первых вступлений.



а



б

Рис. 4. Типичные сейсмограммы продольных (а) и поперечных (б) волн при прослеживании уровня грунтовых вод. Кругом показана звуковая волна

На сейсмограмме продольных волн годограф первых вступлений содержит два участка – слабывыпуклый, связанный с зоной аэрации, и практически прямолинейный, приуроченный к уровню грунтовых вод. На сейсмограмме поперечных волн в первых вступлениях прослеживается только прямая рефрагированная волна с выпуклым криволинейным годографом. В обоих случаях наблюдается сложное строение осей синфазности, характерное для глинистых грунтов. Интерференция множества элементарных преломлённых волн приводит к усложнению формы импульса и снижает точность проведения корреляции годографа [8].

Для определения относительного градиента скорости  $\beta$  можно использовать способ, предложенный Г.А. Гамбурцевым [9]. Годограф первых вступлений  $t = f(x)$  с признаками рефракции лучей прямой волны пересчитывается в график вида  $w = f(u)$

$$u(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^2, w(x) = \left(\frac{V_K(x)}{V_K(0)}\right)^2, \quad (2)$$

где  $V_K(x)$  – кажущаяся скорость, вычисленная по наклону годографа на удалении  $x$  от источника;  $V_K(0)$  – кажущаяся скорость на нулевом удалении (в источнике). Построенный график разбивается на относительно прямолинейные участки, для каждого из них рассчитывается относительный градиент  $\beta$

$$\beta = \sqrt{\frac{\Delta w}{\Delta u}}. \quad (3)$$

Рассмотренная технология позволяет проводить более тонкий и глубокий анализ сейсмогеологической среды, так как принимается во внимание её градиентный характер [3]. Пример найденных законов изменения скорости с глубиной

по продольным и поперечным волнам приведён на рис. 5. Уровень грунтовых вод был найден по локальному максимуму относительного градиента скорости.

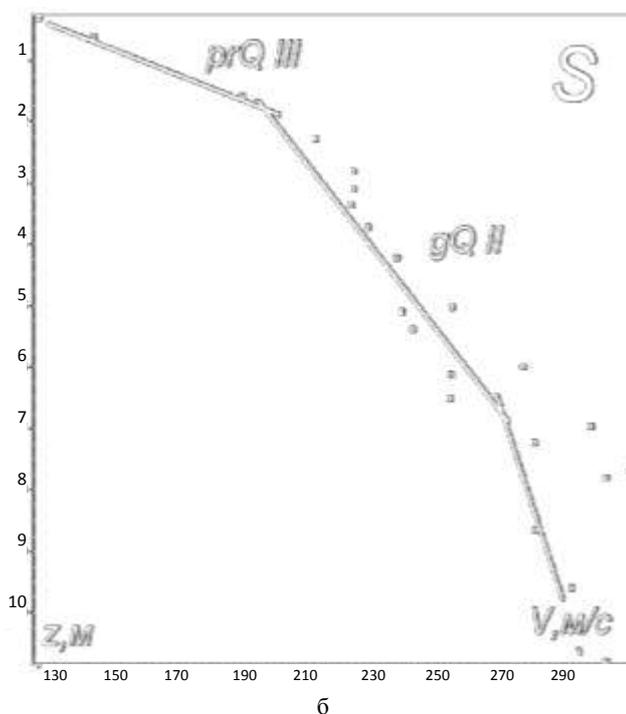
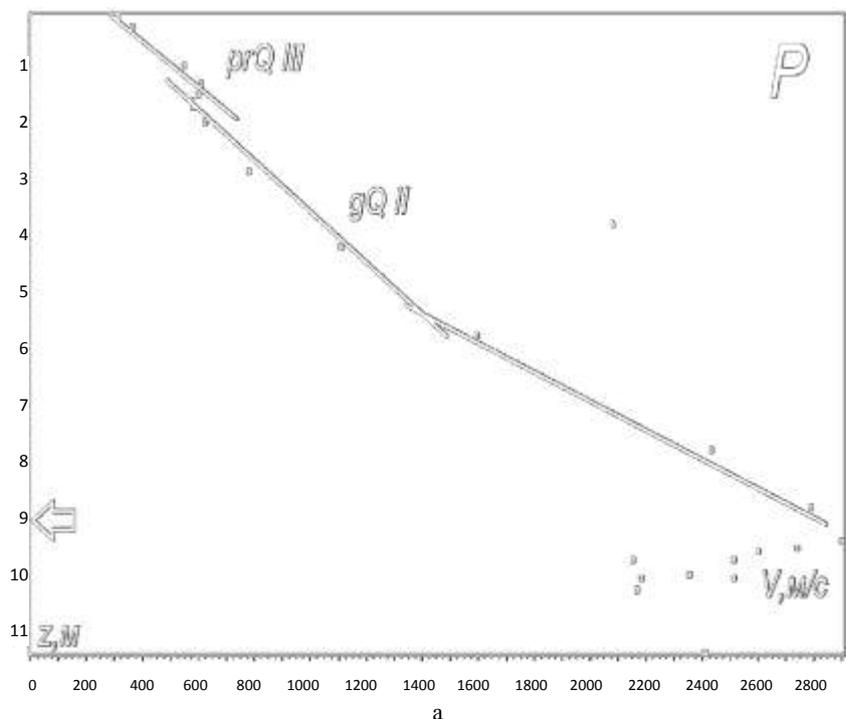


Рис. 5. Законы изменения скорости с глубиной продольных (а) и поперечных (б) волн. Первый слой разреза сложен покровными суглинками верхнего плейстоцена, ниже залегает морена московского оледенения (средний плейстоцен). Стрелкой выделен уровень грунтовых вод, найденный по данным продольных волн

### Выводы

В результате изучения значительного объёма материалов инженерной сейсморазведки, проведённой авторами статьи с целью выделения УГВ в глинистых грунтах, были выявлены следующие закономерности:

1. Наибольшие градиенты характерны для первых 2–3 м разреза, где залегают самые молодые и рыхлые грунты, наиболее подверженные уплотнению под весом вышележащих пород.

2. Относительные градиенты скорости поперечных волн в целом в несколько раз меньше, чем у продольных, вплоть до уровня грунтовых вод, так как на скорость поперечных волн не влияет постоянно возрастающий объём воды, поступающей из капиллярной каймы.

3. Градиент скорости продольных волн имеет тенденцию возрастать с глубиной до УГВ, а затем резко снижается, так как поры грунта полностью заполняются водой и влияние влажности на скорость продольных волн прекращается.

4. Достижение скоростью продольной волны значения 1500 м/с следует отождествлять с верхней границей полностью водонасыщенной капиллярной каймы.

5. Градиент скорости поперечных волн плавно уменьшается с глубиной из-за приближения к пределу уплотнения грунта из-за возрастающего литостатического давления.

6. Надёжное определение градиента продольных волн на глубинах, превышающих положение УГВ, затруднено из-за малой кривизны годографа первых вступлений, что приводит к неустойчивости решения.

### Литература

1. *Всеволожский В.А.* Основы гидрогеологии. М., 1991. 351 с.
2. *Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М.* Сейсмические методы в инженерной геологии. М., 1979. 143 с.
3. *Романов В.В.* Изучение толщи четвертичных отложений Подмосковья инженерной сейсморазведкой // *Геофизика*. 2014. № 3. С. 41 – 48.
4. *Кувалдин А.В., Романов В.В., Рахматуллин И.И.* Сейсморазведочные исследования в строительстве // *Профессиональное образование и общество*. 2014. № 2(10). С. 56 – 58.
5. *Романов В.В., Рахматуллин И.И.* Инженерная геофизика при изучении гляциальных отложений Дмитровского района Подмосковья // *Изв. вузов. Геология и разведка*. 2014. № 3. С. 86–88.

6. *Романов В.В., Рахматуллин И.И.* Инженерная сейсморазведка при проектировании газопроводов // *Науч. журн. Рос. газ. общ-ва*. 2013. Пилотный выпуск. С. 56 – 63.

7. *Романов В.В.* Применение амплитудных графиков при обработке и интерпретации данных метода преломлённых волн для решения задач инженерной геологии // *Изв. вузов. Геология и разведка*. 2012. № 4. С. 56 – 60.

8. *Романов В.В.* Возможности повышения разрешенности сейсмограмм метода преломлённых волн (МПВ) // *Технологии сейсморазведки*. 2013. № 4. С. 67 – 73.

9. *Берзон И.С., Гамбурцев Г.А., Ризниченко Ю.В.* Корреляционный метод преломленных волн : руководство для инженеров-сейсморазведчиков. М., 1952. 240 с.

### References

1. *Vsevolzhskii V.A.* Osnovy gidrogeologii [Fundamentals of hydrogeology]. M., 1991. 351 s.
2. *Goriainov N.N., Liakhovitskii F.M.* Seismicheskie metody v inzhenernoi geologii [Seismic methods in engineering geology]. M., 1979. 143 s.
3. *Romanov V.V.* Izuchenie tolshchi chetvertichnykh otlozhenii Podmoskov'ia inzhenernoi seisemorazvedkoi [The study of quaternary deposits suburbs engineering seismology] // *Geofizika*. 2014. № 3. S. 41 – 48.
4. *Kuvaldin A.V., Romanov V.V., Rakhmatullin I.I.* Seismorazvedochnye issledovaniia v stroitel'stve [Seismic studies in construction] // *Professional'noe obrazovanie i obshchestvo*. 2014. № 2(10). S. 56 – 58.
5. *Romanov V.V., Rakhmatullin I.I.* Inzhenernaia geofizika pri izuchenii gliatsial'nykh otlozhenii Dmitrovskogo raiona Podmoskov'ia [Engineering geophysics in the study of glacial deposits Dmitrov district of Moscow region] // *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*. 2014. № 3. S. 86–88.
6. *Romanov V.V., Rakhmatullin I.I.* Inzhenernaia seisemorazvedka pri proektirovanii gazoprovodov [Seismic engineering in the design of pipelines] // *Nauch. zhurn. Ros. gaz. obshch-va*. 2013. Pilotnyi vypusk. S. 56 – 63.
7. *Romanov V.V.* Primenenie amplitudnykh grafikov pri obrabotke i interpretatsii dannykh metoda prelomlennykh voln dlia resheniia zadach inzhenernoi geologii [Application of amplitude graphs with data processing and interpretation method of refracted waves for solving problems of engineering geology] // *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*. 2012. № 4. S. 56 – 60.
8. *Romanov V.V.* Vozmozhnosti povysheniia razreshennosti seismogramm metoda prelomlennykh voln (MPV) [The possibility of increasing the resolution of the method of refracted waves seismograms (MSP)] // *Tekhnologii seisemorazvedki*. 2013. № 4. S. 67 – 73.
9. *Berzon I.S., Gamburtsev G.A., Riznichenko Iu.V.* Korreliatsionnyi metod prelomlennykh voln : rukovodstvo dlia inzhenerov-seisemorazvedchikov [Correlation method of refracted waves: a guide for engineers, seismologists]. M., 1952. 240 s.