

УДК 537.87, 621.371

**ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ БОЛЬШИХ ГЛУБИН**Л. Б. Волкомирская<sup>1,2</sup>, О. А. Гулевич<sup>1,2</sup>, Г. А. Ляхов<sup>3</sup>, А. Е. Резников<sup>1</sup><sup>1</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское ш. д.4<sup>2</sup> ООО «Таймер», 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Лесная д.4Б<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

Статья поступила в редакцию 31 марта 2019 г.

**Аннотация.** Проанализировано влияние формы зондирующего импульса на предельную глубину и разрешающую способность метода георадиолокации. Приведены экспериментальные результаты, полученные при георадиолокационных исследованиях на глубинах более 100-500 метров в Якутии. Сделаны количественные оценки затухания видео импульсного сигнала для разных по литологическому составу сред. Полученные результаты могут послужить экспериментальной основой при создании локальных систем радиосвязи и радиозондирования дисперсных сред с сильным затуханием.

**Ключевые слова:** георадиолокация, видеоимпульс, среды с дисперсией.

**Abstract.** GPR method began to develop from the middle of the twentieth century and by the end of the century was effectively applied in solving some geophysical problems in the upper layers of the earth's surface. With the exception of the thick ice sounding in the polar regions, however, the method was effective only in studying the first tens of meters of natural media with low absorption of electromagnetic waves. For the further development of the technology an increase of the penetration depth is crucial.

The influence of the shape of the transmitted pulse on the penetration depth and resolution of the GPR method is analyzed. The features of constructing radar devices for subsurface sensing of media with high attenuation and dispersion are discussed. Design features of radar devices for subsurface sensing of media with high attenuation and dispersion are discussed. It is noted that the theory of interaction of video pulses with absorbing disperse media is currently not sufficiently developed for

many applications. The lack of developed theory about the model of interaction of video pulses with absorbing media with high dispersion complicates the solution of the inverse problem of reconstructing the medium parameters from experimental GPR data.

Experimental results obtained during GPR studies at depths of more than 100-500 meters in Yakutia are given. The advantage of using high-voltage video pulses for the study of natural media with high attenuation and dispersion is confirmed. Quantitative estimates of the attenuation of the video pulse signal made for media with different lithological composition. The results obtained can serve as an experimental basis for creation of local radio communication systems and radiosounding of disperse media with high attenuation.

**Key words:** GPR, video pulse, dispersion media.

## 1. Введение

Метод георадиолокации начал развиваться с середины двадцатого столетия и к концу века эффективно применялся в решении ряда геофизических задач в приповерхностных слоях земной поверхности. За исключением исследования многометровых толщ льдов в приполярных областях Земли, однако, при зондировании других природных сред метод был эффективен при исследовании только первых десятков метров и только в средах с низким поглощением электромагнитных волн. Одной из причин ограниченной глубины исследований георадиолокаторами разных производителей был механический перенос принципов создания аппаратуры хорошо зарекомендовавшей себя в задачах классической радиолокации реализуемых в атмосфере-среде с малой дисперсией и низким поглощением на исследование приповерхностных земных сред, отличающихся сильным затуханием и дисперсией. Практически все существенные для увеличения глубины зондирования, возможности совершенствования аппаратуры в этом направлении были исчерпаны за несколько десятилетий и прогресс в этом направлении затормозился. Для дальнейшего развития технологии увеличение глубины зондирования является

критически важным параметром. Примерно четверть века назад была сконструирована аппаратура для подповерхностного радиозондирования использующая высоковольтные видеоимпульсы. Особенности конструкции аппаратуры и экспериментальные результаты, полученные при различных подходах, обсуждались на сессии Отделения общей физики и астрономии РАН 26 января 2000 года, и один из двух докладов был опубликован [1]. Дальнейшее развитие георадиолокации как больших (более 100 метров), так и малых (до 50 метров) глубин подтвердило преимущества использования высоковольтных видеоимпульсов для исследования природных сред с сильным затуханием и дисперсией.

## **2. Экспериментальные данные**

Основой метода георадиолокации больших и малых глубин является ударное возбуждение излучающей антенны газовым или твердотельным генератором высоковольтных наносекундных импульсов. В использовании для ГРЛ такие сигналы имеют ряд очевидных преимуществ по сравнению с широкополосными сигналами (с линейной частотной модуляцией) или шумоподобными (с фазовой модуляцией). Время прихода к приёмнику сигнала, отражённого от близко расположенных подповерхностных неоднородностей сопоставимо с базой широкополосных сигналов, формируемых этими способами, и на выходе приёмного устройства эти сигналы плохо разрешаются. Видеоимпульс лишён этого недостатка, хотя занимаемый им частотный диапазон может быть существенно шире. В спектре зондирующего импульсного сигнала присутствуют и существенная высокочастотная и низкочастотная составляющие, что обеспечивает и хорошее пространственное разрешение, и большую глубину зондирования. Решение технических проблем, связанных с излучением и приёмом видеоимпульса в значительной мере облегчается технологической простотой увеличения его амплитуды и мощности в сравнении с другими способами формирования широкополосных сигналов.

Передающая (или приёмная) антенна, в которой попарно комбинируются четвертьволновые электрические диполи, в общем случае является резонансной системой, имеющей собственную частоту и добротность, определяемую геометрией антенны (длиной, формой) и свойствами подстилающей поверхности. Как любая резонансная система, она может быть либо осциллирующей, либо аperiодической, в зависимости от потерь энергии системы на радиоизлучение и тепло. Если в георадарах используется антенны без дополнительной искусственной диссипации энергии, как это имеет место в большинстве приборов (например, антенны типа «бабочка»), то излучаемый сигнал имеет осциллирующий характер с затуханием. Форма подобного сигнала показана на рис. 1

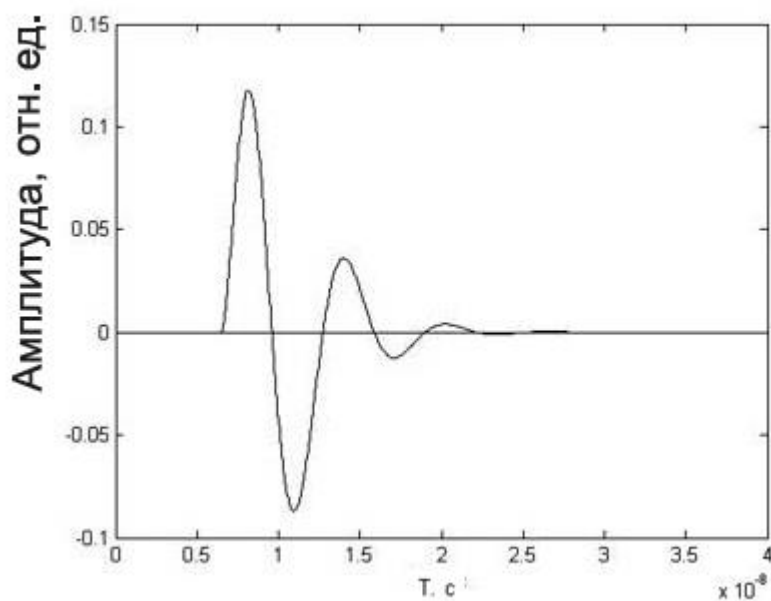


Рис.1 Осциллирующий импульс с затуханием.

Функция импульса на рис. 1 пересекает нулевую ось многократно, а теоретически - бесконечное число раз все с меньшей амплитудой, поскольку ее асимптотика есть  $F \sim e^{-\alpha t} \cos(\omega t)$ . Здесь  $\alpha$  - коэффициент затухания,  $\omega$  - собственная частота колебательной системы. Такой режим излучения существенно усложняет обработку экспериментальных данных, зашумлённых многократными переотражениями.

Чтобы обеспечить аperiодический режим излучения, необходимо ввести в антенну дополнительные элементы для эффективной диссипации энергии. Аperiодический зондирующий импульс показан на рис.2.

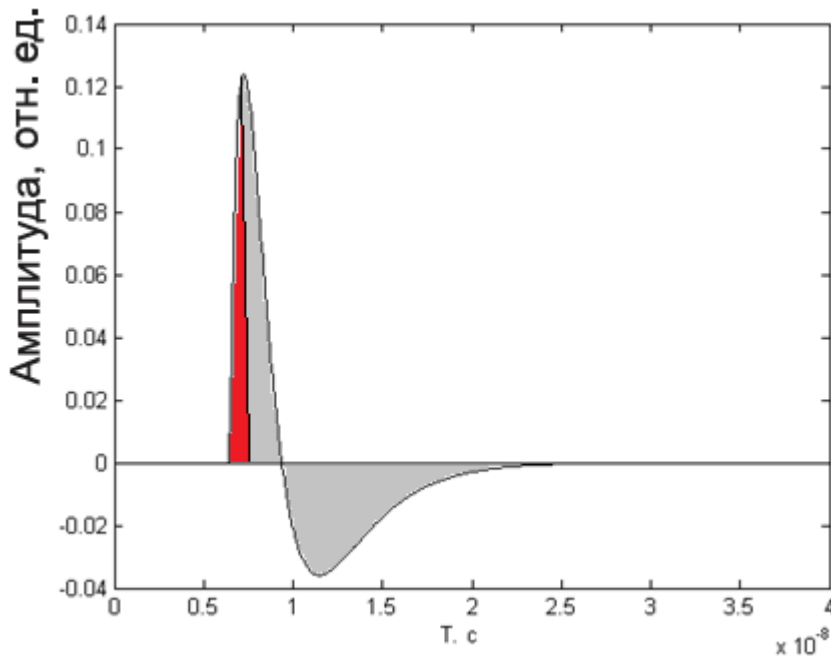


Рис.2 Аperiодический импульс. Красным цветом выделен передний фронт импульса. Серым — задний фронт, переходящий в «хвост».

Функция пересекает нулевую ось один раз. В аperiодическом сигнале «хвост» асимптотически стремится к нулю, не пересекая оси. Асимптотика этой функции  $F \sim -e^{-\alpha t}$ . Такая функция может считаться практически идеальной для зондирования импульсом георадара больших глубин, что подразумевает отсутствие аппаратного ограничения частотной полосы снизу. Можно рассматривать такую форму импульса и как результат предельной трансформации радиоимпульса с высокочастотным заполнением, вплоть до полного совпадения огибающей радиоимпульса, с заполняющей её синусоидой, на одном несимметричном периоде. Передний фронт такого импульса формирует высокочастотную составляющую спектра, а задний, затянутый во времени фронт, низкочастотную.

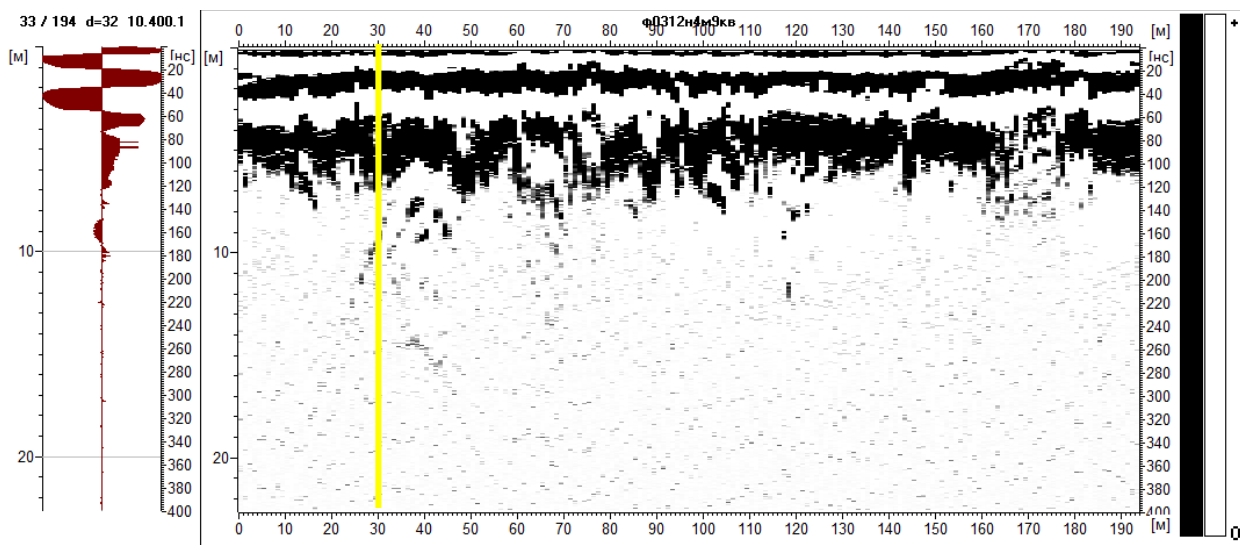
Радарограммы, получаемые с помощью аperiодического сигнала, обладают лучшим качеством по разрешению и меньше зашумлены, чем при

осциллирующем сигнале, когда отражение от каждой границы сопровождается периодическими повторами («звоном»). Однако использование аperiodического сигнала связано с дополнительными потерями энергии, уменьшающими доступный рабочий потенциал радара. Поэтому резистивно нагруженные антенны могут использоваться преимущественно в георадарах с большим потенциалом, когда можно потратить часть энергетике прибора на повышение качества данных, хотя при этом несколько снижается предельно достижимая глубина зондирования.

Следует иметь в виду, что антенна георадара, как правило, располагается на поверхности почвы. В этом случае поверхностные слои почвы находятся в ближней зоне антенны, т.е. также формируют основные характеристики антенны, которые влияют на её диаграмму направленности и форму импульса [2]. Так, с увеличением проводимости прилегающей почвы форма импульса становится более аperiodической, в то время как на сухом песке диполь с таким же распределением резистивной нагрузки может излучать осциллирующий импульс.

Некоторые особенности исследуемой среды опытный оператор видит непосредственно на радарограмме, полученной в результате профилирования, когда приёмная и передающая антенны, с фиксированным расстоянием между ними, перемещаются по поверхности. Для детального анализа и применения сложных процедур обработки используются так называемые волновые формы, автоматически получаемые в каждой точке зондирования. Волновая форма содержит информацию об амплитуде отраженного сигнала от каждого зондирующего импульса на вертикальной временной шкале вплоть до его затухания. По волновой форме можно определить полярность, время задержки сигналов, отражённых от границ, и свойства слоёв - по ширине осцилляций. Простейшая интерпретация основана на рассмотрении прохождения и отражения переднего фронта зондирующего импульса распространяющегося со скоростью света в веществе [3]. Это означает, что, отслеживая время задержки отражения фронта от границ пород с разными электрофизическими свойствами,

можно определять их положение. Полярность при отражении также характеризует электрофизические свойства контактирующих пород. Так, если волна переходит из среды с меньшей диэлектрической проницаемостью или проводимостью, в среду с большими значениями этих параметров, импульс меняет полярность и не меняет полярность в противоположном случае. Форма отраженного импульса (например, его ширина) определяется дисперсией среды и шириной переходной зоны (границы) между слоями. Эти параметры могут быть оценены для большого класса функций, как осциллирующих, так и апериодических. Надежность оценок, тем не менее, будет зависеть от уровня шумов и формы зондирующего импульса и, при прочих равных условиях, апериодические сигналы дадут более надежные оценки, чем осциллирующие. Действительно, чем круче передний фронт зондирующего импульса (рис. 2), тем точнее будет регистрироваться граница раздела сред с разными электрическими свойствами, благодаря обогащению спектра высокими частотами.



А

Б

Рис. 3. Волновая форма отраженного сигнала относительно оси временной задержки(А) и радарограмма в амплитудном представлении (Б).

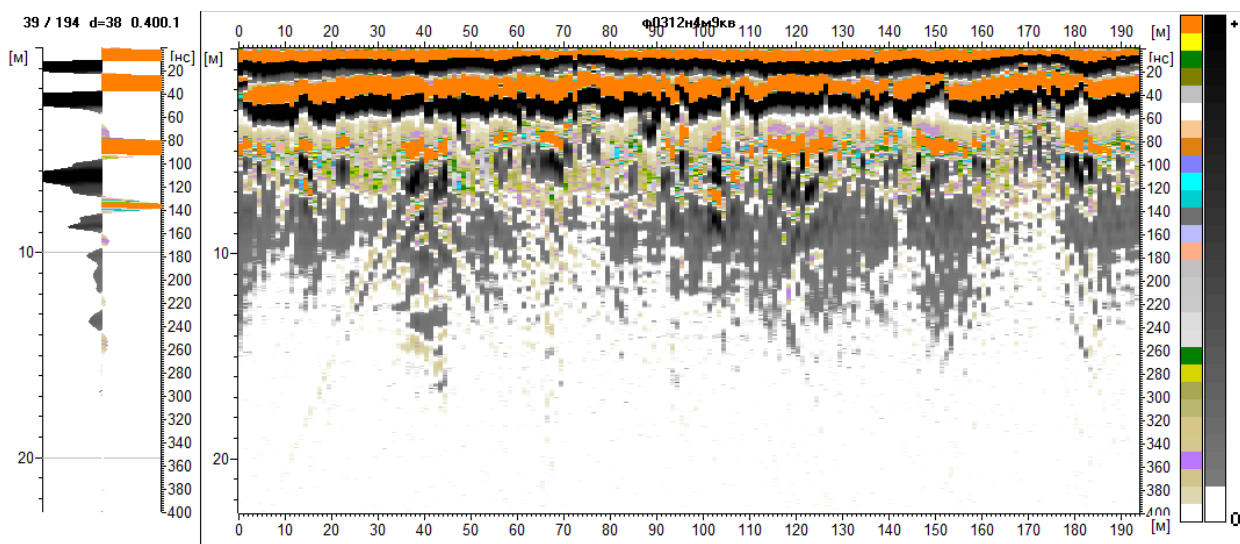


Рис. 4 Волновая форма отраженного сигнала относительно оси временной задержки (А) и радарограмма в представлении амплитуды в 56 градациях цветов (Б).

На рис. 3 представлен пример записи волновой формы в 32-ой точке профиля (обозначена желтой вертикальной линией на радарограмме) (рис. 3А). Радарограмма (рис. 3Б) представляет собой 2D визуализацию совокупности волновых форм на профиле, в которой амплитуда сигнала кодируется цветом, что упрощает восприятие двумерных изображений соответствующих профилей. На рис. 3Б в черно-белом представлении сигнал от оси справа окрашен черным цветом, а сигнал противоположной полярности окрашен белым цветом. Линия максимума (минимума), соединяющая амплитуды сигналов одинаковой полярности соседних волновых форм, определяет линии синфазности сигнала, которым и соответствуют границы подповерхностных слоев [4]. В случае отражающей границы линия синфазности практически повторяет ее форму. В случае дифракции от локального объекта, как например, на участке профиля рис 3Б с 20 по 50 метр, линия синфазности имеет форму гиперболы из-за достаточно широкой диаграммы направленности передающей и приемной антенн. Поэтому при движении по профилю локальный подповерхностный объект наблюдается не только в точке непосредственно над ним, но также на некотором удалении в обе стороны, причем величина этого удаления



определяется угловой шириной диаграммы направленности антенн и соотношением электрических свойств двух сред на поверхности, по которой перемещаются антенны.

Минимальная амплитуда регистрируемого отраженного сигнала и, соответственно, предельная глубина зондирования определяются динамическим диапазоном георадара.

Цвета, представляющие амплитуду сигнала, можно использовать как фильтр, позволяющий визуализировать не только прохождение фронта зондирующего импульса, но и всего тела импульса с отображением его затухания и расплывания [5,6].

Рассмотрим пример применения высоковольтных видеоимпульсных георадаров при работах на площади Самолазовского золоторудного месторождения в Якутии в 2017 году [7]. Одной из задач было достижение максимальной глубины зондирования и привязкой к данным керна, полученного при бурении скважин.

Конструкция передатчика и антенн позволила сформировать зондирующий сигнал в виде апериодического видеоимпульса с длительностью переднего фронта около 10 нс.

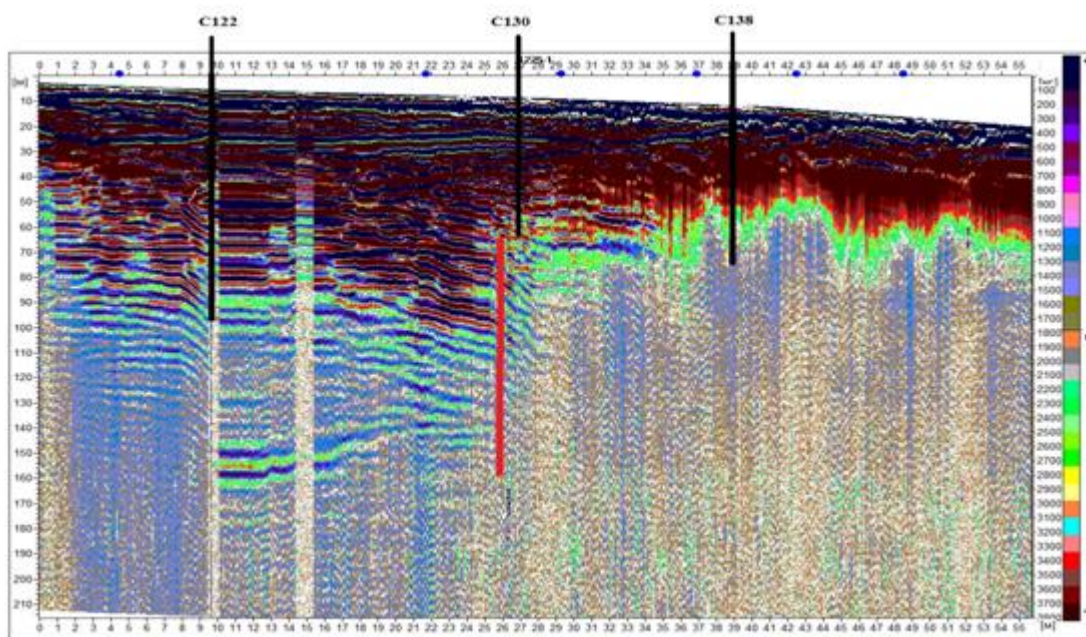


Рис. 5 Геоэлектрический разрез профиля с усредненной по всей глубине разреза скоростью сигнала.

На рис. 5 по верхней оси отложено расстояние в номерах пикетов (опорных точек). Расстояние между пикетами равно 10 метрам. (Синие точки-техническая информация - пикеты для контроля по GPS и совмещения со скважинами.) Таким образом, общая длина профиля составила 560 метров. Пробуренные скважины отмечены на пройденном профиле. По правой оси показана временная задержка сигнала в наносекундах, по левой оси - глубина, которая получена на основе совмещения границ слоев с геологическим разрезом (рис.6) до глубины 130 метров, соответствующей максимальной глубине скважины пробуренной на 10 пикете профиля. Полученные границы в геоэлектрическом разрезе соответствуют усредненной диэлектрической проницаемости равной 5.

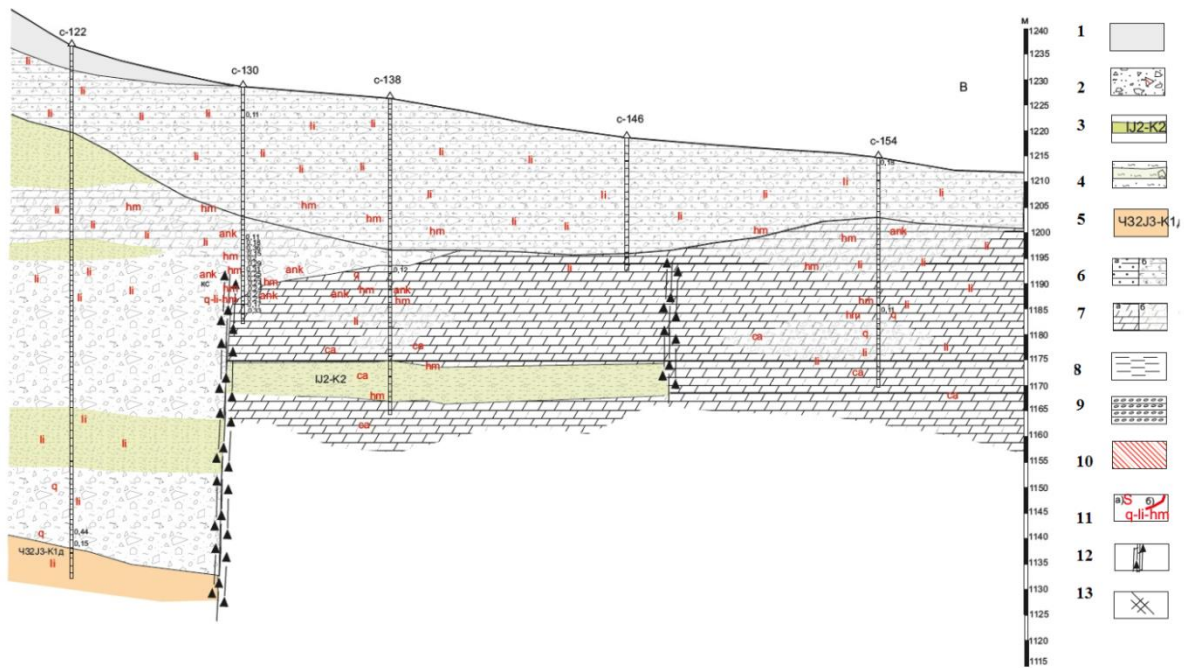


Рис. 6 Фрагмент геологического разреза профиля, пройденного на Самолазовском месторождении: 1 – нерасчленённые склоновые образования, 2 – карстовые образования, представленные песчано-глинистыми отложениями, 3 – лампроиты, 4 – лампроиты разрушенные, 5 – штоки, 6а – песчаники, 6б – песчаники выветрелые, 7а – доломиты, 7б – доломиты выветрелые до глинистого состояния доломиты, 12 – разломы, 13 –трещиноватость.

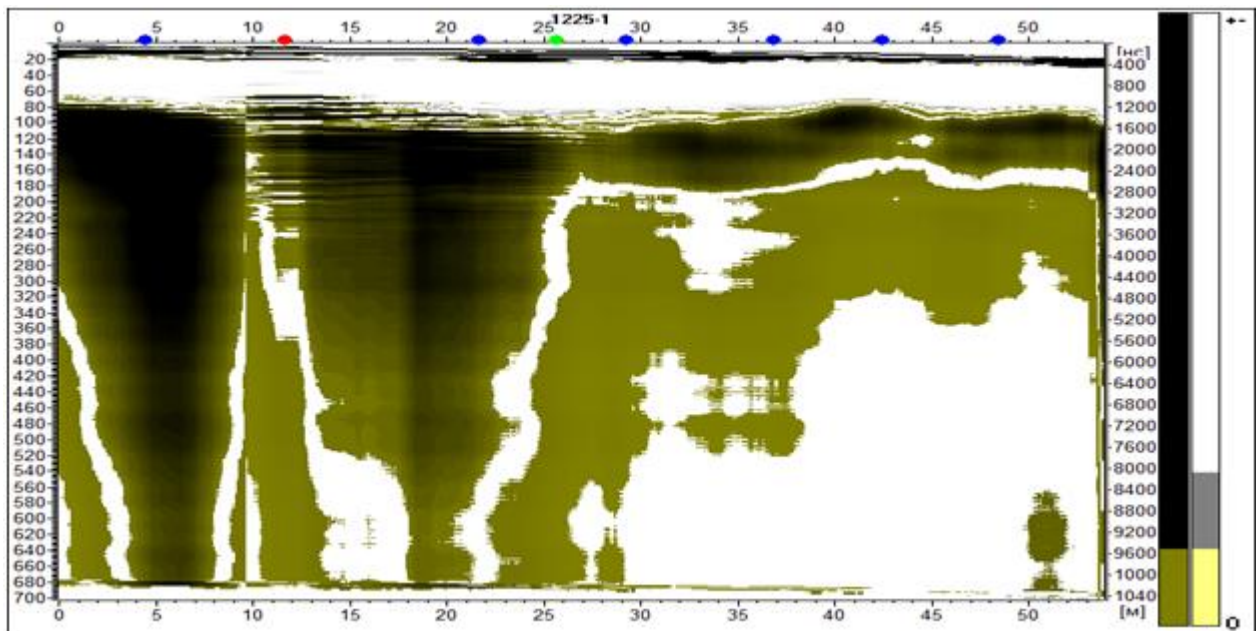


Рис. 7 Радарограмма профиля с выполненной фильтрацией высокочастотных составляющих отраженного сигнала и усредненной по глубине диэлектрической проницаемостью равной 5.

Геоэлектрический разрез был построен по георадарным данным (рис. 7) до временных задержек сигнала 10 нс. При усреднённой скорости распространения сигнала 5 см/нс в геологических породах, описанных на рис. 6 до глубин 130 метров, предельную глубину зондирования можно оценить примерно в 600 метров (рис. 7).

Совместный анализ геоэлектрического и геологического разрезов показывает, что геоэлектрический разрез отчётливо фиксирует неразрушенную карстовую воронку, расположенную с 5-го по 27-ой пикет, во вмещающих породах трещиноватых доломитов. Здесь важно отметить, что, начиная с 30-го пикета, разрез представлен выветрелыми до глинистого состояния доломитами. Глинистые грунты, как известно, характеризуются значительной проводимостью, поэтому естественно ожидать меньшей предельной глубины зондирования на этом участке. И действительно, анализ рис. 5, 7 показывает, что затухание отраженного сигнала на участке профиля, начиная с 30-го пикета, возрастает более чем в 2 раза.

С учетом данных о динамическом диапазоне аппаратуры, применяемой в описываемом эксперименте (140дБ) и данных о затухании ( $\Gamma$ ) отраженного

сигнала в разных участках профиля, можно рассчитать затухание и, следовательно, относительную усредненную проводимость в разных точках профиля. Например, при усредненной диэлектрической проницаемости 6,5, характерной для доломитов[8] для пикета 5 имеем значение усредненного удельного затухания  $\Gamma = 0,12\text{дБ/м}$ , а для пикета 43 -  $\Gamma = 0,29\text{дБ/м}$ . Значение диэлектрической проницаемости 5, как на рис. 7, приведет к еще меньшему значению удельного затухания.

### **3. Обсуждение экспериментальных результатов**

Использование видеоимпульсов, содержащих низкочастотную составляющую в регистрируемом сигнале, открывает новые возможности интерпретации низкочастотной составляющей в ГРЛ. В приведенных экспериментальных примерах величина временных задержек отраженного сигнала становится соизмеримой с временами становления поля в методах электроразведки [9,10] Изучение поля переходных процессов, возбуждаемых в горных породах при импульсном переключении тока в источнике, в электроразведке опирается на использование квазистационарного приближения при решении обратной задачи восстановления параметров разреза. Разработанные для методов электроразведки приемы количественной интерпретации основаны на сравнении измеренных кривых зависимости кажущегося электрического сопротивления горных пород от времени с теоретическими кривыми. При этом в теоретическую модель всегда закладываются априорные сведения о количестве слоев в подстилающем разрезе.

Волновая природа метода ГРЛ, в котором появляется возможность одновременного измерения двух параметров: скорости распространения сигнала и проводимости, существенно расширяет возможности интерпретации экспериментальных данных. Характер отражения импульсного сигнала от границ раздела сред с разными литологическими свойствами позволяет непосредственно определять количество слоев и их мощность в подстилающем

разрезах - с разрешающей способностью, недостижимой в методах электроразведки [11].

Зондирование видеоимпульсами заранее хорошо известных геологических разрезов, как, например, Самолазовского месторождения, подтверждают возможность фиксации отражений с глубин более 500 метров. Глубина зондирования георадарами, построенными по традиционной схеме, на грунтах с сопоставимыми электрическими свойствами, не превышает 50 метров.

Кроме перечисленных причин, следует отметить, что теория взаимодействия видеоимпульсов с поглощающими диспергирующими средами в настоящее время в достаточной для многих приложений степени не развита. Нет даже устоявшейся терминологии, учитывающей быстрое изменение поля и конечную пространственную протяжённость видеоимпульсов в исследуемых средах, когда классические определения диэлектрической проницаемости и иных терминов, описывающих процессы в приближении геометрической оптики, практически неприменимы [12]. Можно также предполагать, что электрическая компонента квазимонохроматических сигналов затухает в таких средах заметно быстрее, чем у видеоимпульсов [12]. Отсутствие развитых теоретических представлений о модели взаимодействия видеоимпульсов с поглощающими средами с сильной дисперсией усложняет решение обратной задачи восстановления параметров исследуемой среды по экспериментальным данным.

#### **4. Выводы**

Обсуждены особенности построения схем радиолокационных устройств для подповерхностного зондирования сред с высоким затуханием и дисперсией. Отмечены преимущества использования для ГРЛ высоковольтных видеоимпульсов, обеспечивающих высокую разрешающую способность и большую глубину зондирования. Приведен пример практического применения георадаров с большим динамическим диапазоном для зондирования природных сред и, в некоторых случаях, определены коэффициенты затухания

сверхширокополосных видеоимпульсов в природных средах. На основе полученных результатов предполагается, в обозримой перспективе, создание систем радиозондирования и радиопросвечивания на глубину более 1 км и систем локальной подповерхностной радиосвязи.

### Литература

1. А.Е. Резников, В.В. Копейкин, Морозов П.А., Щёкотов А.Ю. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения. *Успехи физических наук*, 2000, т.170, №5, с. 565-568.
2. Rudenchik E.A., Volkomirskaya L.B., Reznikov A.E., Bezrukova E.G. Analytical Representation of the field surface wave generated by an antenna at the interface of two homogeneous media. *Physics of Wave Phenomena*, 2010, Vol. 18, No. 2, pp.1-9.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*. М., Наука, 1982, 389 с.
4. Владов М.Л., Старовойтов А.В., *Введение в георадиолокацию*. М.: изд-во МГУ, 2004, 153 с.
5. Rudenchik E.A., Volkomirskaya L.B., Reznikov A.E. Study of Signal Propagation in One-Dimensional Electrodynamics for Interpretating Electromagnetic Sounding Data. Consideration of Conductivity in the Function of Permittivity. *Physics of Wave Phenomena*, 2008, Vol. 16, No. 2, pp. 1-14.
6. Волкомирская Л., Гулевич О., Руденчик Е. Георадиолокация в средах с дисперсией. Зависимость амплитуды и формы импульса георадара от дисперсии среды. Из-во LAP (Lambert Academic Publishing) 2013. С. 81. ISBN 978-3-659-35367-3
7. Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Гулевич О.А., Сахтеров В.И, Горкин Д.С., Резников А.Е. Оценка эффективности использования высокоразрешающей электроразведки на Самолазовском золотоскарновом месторождении // *Маркшейдерия и недропользование*. № 4, 2018г., с. 8-13.
8. Иванов А.Г. *Физика в разведке земных недр*. М.: Недра, 1971. 200 с.

9. Могилатов В.С. Импульсная электроразведка. Новосибирск. Изд. Новосиб. Гос. Ун-т, 2002, 208 с.
10. Эпов М.И., Ельцов И.Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. - Новосибирск: Изд. ОГГиМ СО РАН, 1992, N 2, 31 с.
11. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Резников А.Е. Глубинный георадар открывает тайны гигантской воронки на полуострове Ямал // Экологические системы и приборы. №7, 2017, с. 43-51.
12. Шварцбург А.Б. Видеоимпульсы и непериодические волны в диспергирующих средах (точно решаемые модели). УФН, 1998, 168, №1, с.85-103.

**Для цитирования:**

Л. Б. Волкомирская, О. А. Гулевич, Г. А. Ляхов, А. Е. Резников. Георадиолокация больших глубин. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr19/6/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.4.6