

УДК 550.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-4-114-123

## КОНТРАСТЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОМ РАЗРЕЗЕ И ИХ ОТРАЖЕНИЕ НА РАДАРОГРАММЕ

Мария Александровна Тарасова<sup>1</sup>✉, Светлана Сергеевна Бричева<sup>2</sup>,  
Михаил Львович Владов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tarasovama@my.msu.ru ✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт Географии РАН, Москва, Россия; svebrich@gmail.com

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vladov\_ml@mail.ru

**Аннотация.** В песчано-глинистом разрезе были обнаружены расхождения по глубине литологических границ с контрастами электромагнитных свойств отложений. Как следствие, на георадарных данных оси синфазности отраженных волн не привязываются по глубине с литологическими границами, что осложняет геологическую интерпретацию. Была решена прямая задача на основе модели, построенной по измеренным электромагнитным свойствам. Результаты моделирования позволили обоснованно соотнести отражения на георадарных данных с литологическими границами и объяснить их расхождения по глубине. Таким образом, было произведено уточнение геологической интерпретации георадарных данных.

**Ключевые слова:** георадар, песчано-глинистый разрез, рефлектометрия, электромагнитные свойства, полно-волновое, лучевое моделирование

**Для цитирования:** Тарасова М.А., Бричева С.С., Владов М.Л. Контрасты электрофизических свойств в песчано-глинистом разрезе и их отражение на радарограмме // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 4. С. 114–123.

## THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES CONTRASTS IN SAND-CLAY GROUND AND GPR REFLECTIONS

Mariya A. Tarasova<sup>1</sup>✉, Svetlana S. Bricheva<sup>2</sup>, Mikhail L. Vladov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tarasovama@my.msu.ru ✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University; Institute of Geography of the RAS, Moscow, Russia; svebrich@gmail.com

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vladov\_ml@mail.ru

**Abstract.** In sand-clay ground, the depth variations were established between lithological boundaries and the contrast of electromagnetic properties of the soil. As a result, GPR reflections diverge in depth from the lithological boundaries, complicating geological interpretation. The forward problem is solved using a model constructed from measured electromagnetic parameters. The modeling results made it possible to reasonably relate lithological boundaries to GPR reflections and to determine the cause of their depth variations. Consequently, the geological interpretation of GPR data is enhanced.

**Keywords:** GPR, sand-clay ground, time-domain reflectometry, electrophysical property, full-waveform, raypath modeling

**For citation:** Tarasova M.A., Bricheva S.S., Vladov M.L. The electrophysical properties contrasts in sand-clay ground and GPR reflections. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 4: 114–123. (In Russ.).

**Введение.** Метод георадиолокации имеет широкую сферу применения уже не одно десятилетие. Помимо инженерных приложений, в которых георадар хорошо себя зарекомендовал, в его задачи входит и изучение объектов природного происхождения. Объектами исследования могут быть палеодолины, поймы рек, которые используются при изучении динамики движения ледника [Finlay, 2008]; фундаменты древних зданий — для решения геoarхеологических задач [Снопков, 2019], поля — для целей изучения миграции влаги в почве [Калинкевич и др., 2018].

Результатом геофизических исследований, в частности, георадарных, должен быть глубинный разрез,

на котором проведены границы по осям синфазности, соотнесенные с границами, выделенными специалистами в разрезе, исходя из поставленной перед геофизикой задачей.

Трудности могут начаться с перевода данных в глубинный масштаб. Как известно, для этого необходима информация о скоростях распространения волны в исследуемой среде. Для получения этой информации используется один из трех приемов: по гиперболам дифракции, по годографу отраженной волны, полученному при работе на переменной базе георадара, или путем соотнесения с данными бурения [Владов, Судакова, 2017]. В случае, если первые два способа невозможно применить, то из данных

бурения берется информация о глубине залегания выделенных границ, а из радарограммы — времена прихода отраженных волн, после чего производится их привязка друг к другу и вычисление соответствующих коэффициентов перевода (скоростей) для каждого слоя. Ошибки при этом подходе возникают, когда в изучаемой геологической среде существующие границы изменения электромагнитных свойств не соотносятся с границами, которые могут по-разному выделяться специалистами в зависимости от задачи. Как правило, такие ситуации возникают при интерпретации георадарных данных, полученных при работах в предположительно однородных толщах: лед, вода или песчаные дюны. В этом случае на глубинном георадарном разрезе не ожидается большого количества осей синфазностей, тем не менее они были зафиксированы на термических границах в вечной мерзлоте [Bobrov, et al., 2019; Bradford, et al., 2007], границах с разной минерализацией в воде [Krylov, et al., 2014], с вариацией размеров частиц в песчаных дюнах [Botha, et al., 2003] или на ожелезненных прослоях песка [Van Dam, et al., 2002]. Эти границы без дополнительной информации об отложениях (гранулометрического и минерального состава, влажности и т.д.) могут быть пропущены при полевом описании среды. Тем не менее на этих границах происходит изменение электромагнитных свойств (диэлектрической проницаемости и проводимости), приводящее к отражению георадарного сигнала. Знание контрастов этих свойств на участке георадарного профиля позволяет избежать ошибочной интерпретации и вопрос соотношенности границ изменения электромагнитных параметров с выделяемыми границами будет решен.

В настоящей работе авторы на примере песчано-глинистого разреза со слабо изменяющейся литологией, описанного специалистами-почвоведом, покажут неоднозначность интерпретации георадарных данных и методы, направленные на повышение точности.

Для решения поставленной задачи в качестве объекта исследования был выбран разрез в стенке выкопанного шурфа. Предметом исследования являются контрасты электромагнитных свойств отложений в разрезе.

В качестве инструментов исследования были выбраны следующие: анализ геологического разреза, параметрические измерения электромагнитных свойств (методом рефлектометрии), моделирование (полноволновое и лучевое).

**Анализ геологического разреза.** В качестве участка исследования было выбрано место высокой поймы р. Гусь в районе учебно-научной станции Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Лесуново в Рязанской области. На выбранном участке был выкопан шурф размерами 2,2 м по ширине и 1,8 м по глубине. Специалистами-почвоведом было проведено полевое описание стенки шурфа по следующим признакам: цвет, структура (рыхлый,

уплотненный), текстура (слоистость, однородность), степень влажности (сухой, увлажненный, мокрый), наличие включений (уголь, фрагменты растительности, оксиды железа). Литологическое описание в первую очередь необходимо для визуального (структурно-цветового) разделения разреза. Согласно этому описанию, изучаемый разрез сложен в основном песком, супесью и суглинком. Всего в разрезе почвоведом было выделено 9 литологических слоев и 8 границ (рис. 1).

Стенка была размечена по горизонтали с шагом 20 см (пикеты) и по вертикали с шагом 5 см с началом координат в правом верхнем углу. Полученная сетка необходима для привязки по глубине и пикетам выделенных литологических горизонтов, образцов, отобранных для анализа гранулометрического состава, точек измерений электромагнитных параметров. Выбор сетки с такими параметрами обусловлен толщиной видимых литологических горизонтов и их латеральной изменчивостью. Толщина минимального прослоя (почвенно-растительный) составила 5 см.

В работе также проводился гранулометрический анализ отложений для более точного определения типа изучаемого разреза по сравнению с полевым описанием. Из стенки шурфа были отобраны образцы отложений, в которых было определено процентное содержание частиц с размерностями больше 10 мкм (физический песок) и меньше 10 мкм (физическая глина). В соответствии с классификацией Н.А. Качинского в стенке шурфа были выделены следующие типы пород: песок рыхлый, связанный, супесь, суглинок легкий [Качинский, 1958]. Таким образом, разрез в стенке шурфа можно уверенно идентифицировать как песчано-супесчаный. Литологическая колонка по ПК 20 см была уточнена границами, выделенными по гранулометрическому анализу (рис. 2).

**Методы исследования. Георадарное профилирование.** В рамках исследования было проведено георадарное профилирование вдоль стенки шурфа до его раскопки. Использовался георадар ОКО-3 (Геотех, г. Москва) с частотой излучающей антенны 400 МГц. В работе применялось две методики: непрерывная и в режиме старт-стоп, первая необходима для съемки по профилю длиной 100 м, вторая — для последующей обработки по методу общей глубинной точки (ОГТ) и оценки эффективного значения диэлектрической проницаемости (ДП). Запись и обработка данных производилась с помощью программного обеспечения Cartscan (Геотех, г. Москва). К основным процедурам обработки относились полосовая фильтрация и коррекция амплитуд. Для заключительного этапа обработки — перевода в глубинный масштаб — было выбрано значение скорости 9 см/нс, что соответствует эффективному значению диэлектрической проницаемости 11. В данной статье приводится только фрагмент обработанной радарограммы, пройденный вдоль стенки шурфа. Вертикальная разрешающая способ-

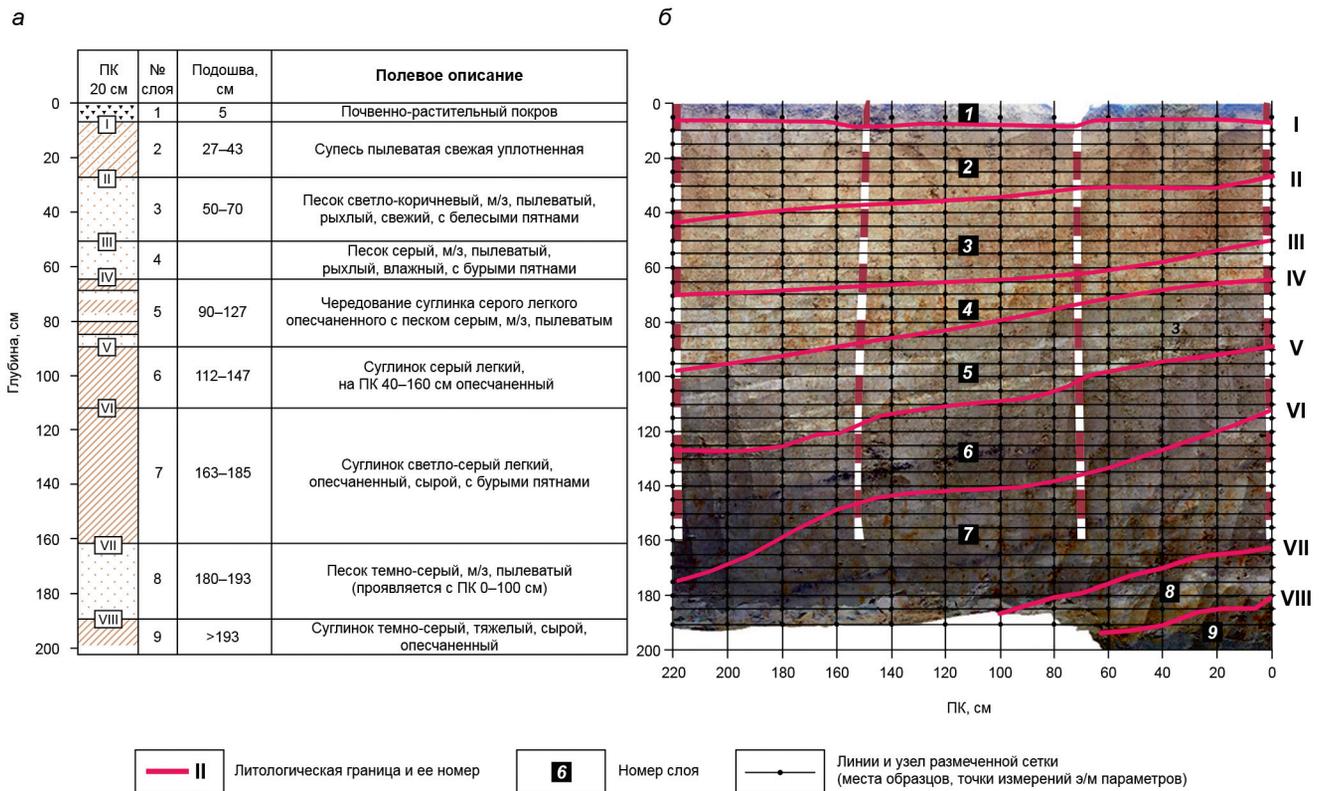


Рис. 1. Геологическая информация о разрезе в стенке шурфа: а — литологическая колонка по полевому описанию на ПК 20 см, б — фото стенки шурфа с наложенными литологическими границами и сеткой

ность используемого георадара для данной частоты и ДП=11 оценивается в 5–6 см.

Динамические характеристики радарограммы (амплитуды) определяются отражательной способностью границ, в общем виде коэффициент отражения  $K_{отр}$  равен [Владов, Судакова, 2017]:

$$K_{отр} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 + i \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0 \omega}} - \sqrt{\varepsilon_2 + i \frac{\sigma_2}{\varepsilon_0 \omega}}}{\sqrt{\varepsilon_1 + i \frac{\sigma_1}{\varepsilon_0 \omega}} + \sqrt{\varepsilon_2 + i \frac{\sigma_2}{\varepsilon_0 \omega}}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  — проводимости в верхней и нижней средах,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\omega$  — круговая частота,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  — действительные части диэлектрической проницаемости в верхней и нижней средах

**Измерения электромагнитных параметров методом рефлектометрии в стенке шурфа.** Электромагнитные параметры отложений измерялись в узлах размеченной сетки шурфа (рис. 1, б). Всего было произведено 432 измерения. Для измерений использовался прибор TDR200 (Campbell Scientific, USA), включающий блок TDR200, коаксиальный кабель, трехстержневой зонд длиной 0,3 м и программное обеспечение PC-TDR. В методе действие прибора основано на независимом измерении времени пробега отраженной волны по коаксиальному кабелю, на основе которого затем рассчитываются значения ДП и проводимости по методу Giese and

Tiemann [Торп, 1980; Robinson, 2003]. Стоит отметить, что реальные среды обладают ненулевой проводимостью, электромагнитные волны в них распространяются с потерями и с меньшей скоростью, чем в непроводящей среде.

Методически работы выполнялись следующим образом: зонд погружали в грунт стенки шурфа в узлах размеченной сетки, затем на него подавался ступенчатый электромагнитный импульс с полосой пропускания от 20 кГц до 1,5 ГГц, после чего регистрировались параметры отраженного сигнала (время), и рассчитывались значения диэлектрической проницаемости и электропроводности.

**Численное моделирование.** Авторы применяют два вида моделирования: полноволновое для учета кратных отражений и поглощения и лучевое моделирование для расчета поля однократных отражений без поглощения. В их основе лежит электрофизическая модель (ЭФМ), основанная на параметрических измерениях электромагнитных свойств (ЭМС) отложений в стенке шурфа. Моделирование в работе необходимо для того, чтобы, приняв во внимание только границы изменения ЭМС и локальных диэлектрических неоднородностей внутри них, проанализировать георадарный отклик от изучаемого разреза. Рассмотрим особенности каждого вида моделирования.

В данной работе для полноволнового моделирования применялась программа gprMax, в основе которой лежит полноволновое решение уравнений

Таблица

Статистические параметры моделей электромагнитных свойств

Для модели диэлектрической проницаемости						
№ слоя	$X$	$\epsilon_{\min}$	$\epsilon_{\max}$	$\bar{\epsilon}$	$D[X]$	CV, %
1	41	4,9	7,6	6,1	0,7	11
2	85	7,0	9,6	8,1	0,7	8
3	37	8,3	10,8	9,4	0,6	7
4	63	11,1	18,6	15,0	2,0	13
5	83	20,6	29,7	24,2	1,7	7
6	34	18,5	23,8	21,5	1,3	6
7	45	12,5	22,2	18,8	2,2	12
Для модели электропроводности						
№ слоя	$X$	$\sigma_{\min}$	$\sigma_{\max}$	$\bar{\sigma}$ , мСм	$D[X]$	CV, %
1	230	0,3	0,9	0,7	0,1	19
2	91	1,0	1,6	1,2	0,2	12
3	29	1,4	2,0	1,7	0,2	10
4	22	2,2	5,5	3,6	0,9	25

Максвелла методом конечных разностей во временной области (FDTD) [Warren, et al., 2016].

Основными параметрами данного моделирования являются размеры единичной ячейки, частота зондирующего импульса, временное окно, положение источника и приемника. Заданное значение частоты было выбрано в соответствии с центральной частотой используемого в полевых условиях георадара 400 МГц. Размеры расчетной области совпадают с размерами стенки шурфа (2,2 м и 1,8 м), размеры ячейки (0,02 м) выбраны исходя из условий стабильности. Расстояние между источником и приемником 0,1 м.

Итоговая электрофизическая модель разреза для подачи на вход вычислений программы grgMax представляет собой его геометрическое изображение в формате .png, в котором объекты (слои) с различными ЭМС отличаются по цвету. Опишем технику построения ЭФМ модели поэтапно.

*1 этап.* Результаты измерений каждого параметра были представлены в отдельных числовых таблицах в координатах  $x, z$ . Было выбрано именно такое представление во избежание ошибок интерполяции и цветовой (визуальной) неоднозначности.

*2 этап.* В двух числовых таблицах, отдельно по ДП и по проводимости, цветом выделялись слои на основе статистического анализа. В тот или иной слой входили значения, формирующие некоторую выборку  $X$ , для которой коэффициент вариации CV был менее 30% (рис. 3). В качестве основного параметра для выделения слоев был выбран коэффициент вариации, так как он используется для определения однородности исследуемой выборки. Выборки, у которых CV больше 30–35% считаются количественно неоднородными [Сизова, 2013]. При этом выделенные слои должны были сохранить

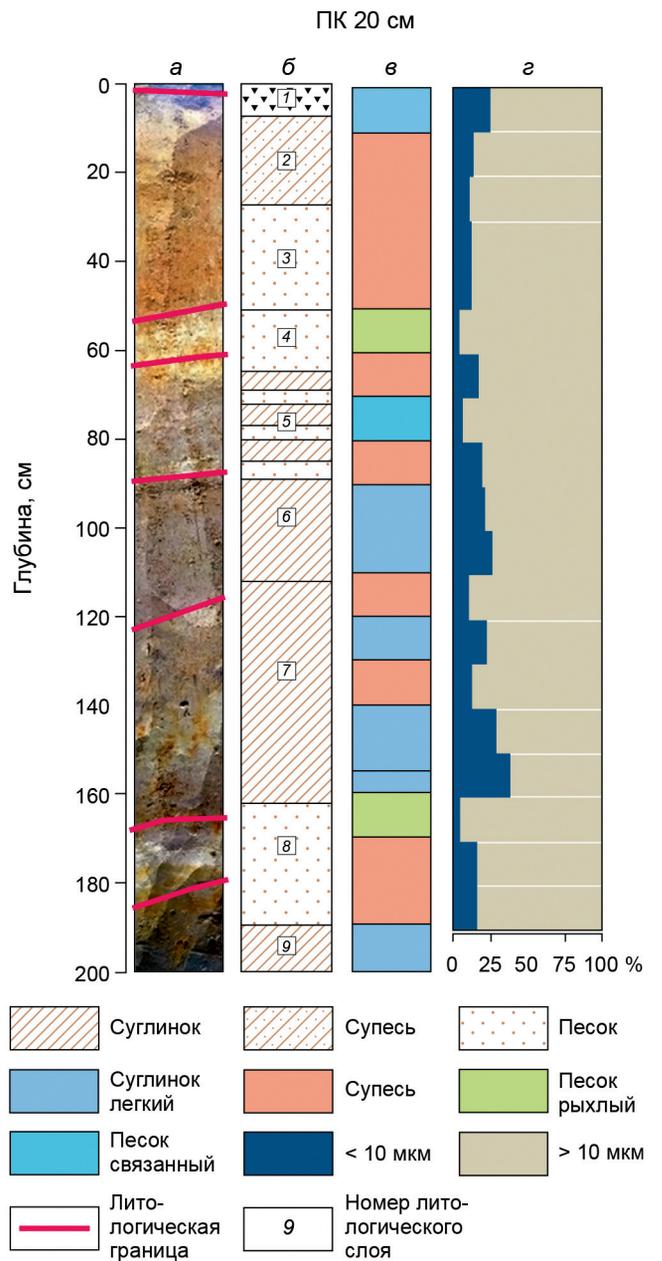


Рис. 2. Различные колонки по ПК 20 см стенки шурфа: а — фрагмент фото отложений, б — литологическая колонка, в — колонка типов пород по классификации Н.А. Качинского, г — диаграмма гранулометрического состава

визуальное подобие наблюдаемому геологическому разрезу в стенке шурфа (рис. 1). Для каждой выборки, отвечающей слою, были по формулам рассчитаны основные статистические параметры: среднее арифметическое по ДП  $\bar{\epsilon}$  и проводимости  $\bar{\sigma}$ , дисперсия  $D[X]$ , которые затем будут использоваться как основные электромагнитные характеристики слоя [Пузаченко, 2004].

В результате числовые таблицы преобразовались в цветные модели по ДП, в которой было выделено 7 слоев, и по проводимости с 4-мя слоями. Свойства каждого слоя определялись средним значением ДП  $\bar{\epsilon}$  и проводимости  $\bar{\sigma}$  в нем. В таблице представлены

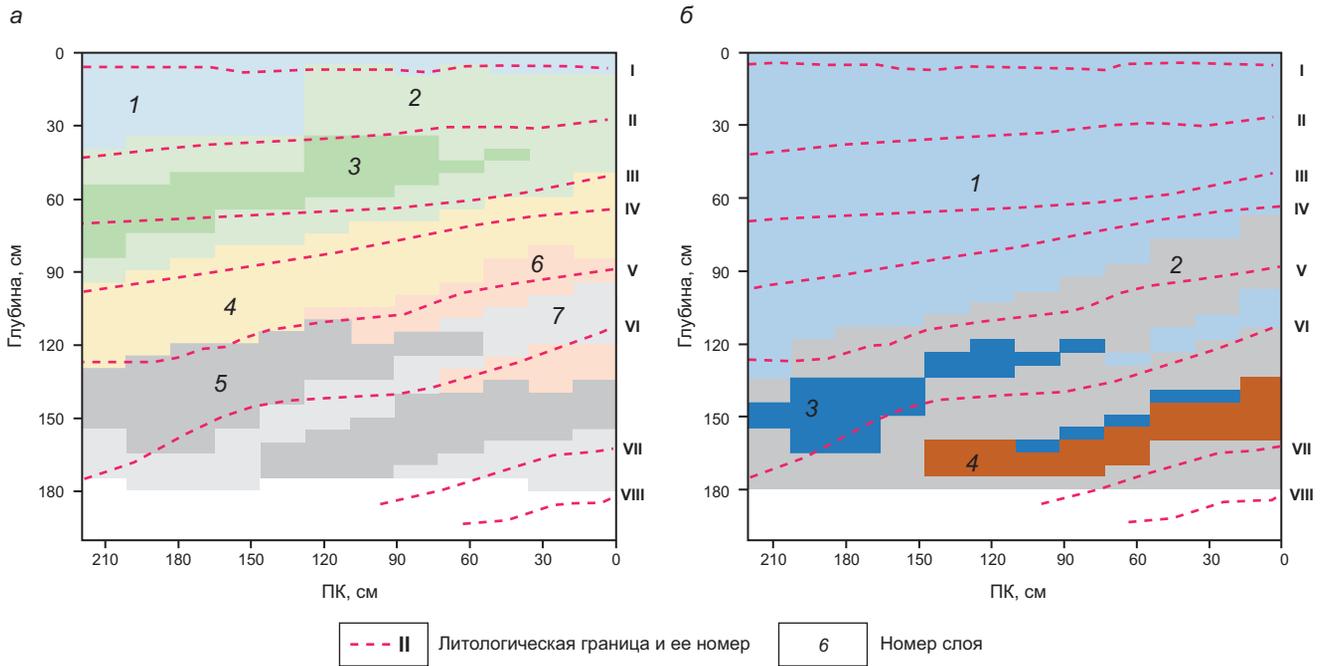


Рис. 3. Ячеистые модели по диэлектрической проницаемости (а) и проводимости (б) с наложенными литологическими границами

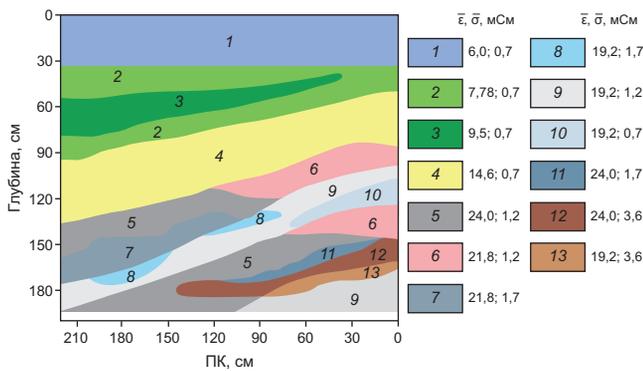


Рис. 4. Итоговая ЭФМ с указанием электромагнитных свойств слоев (1–13)

статистические параметры выборок для каждого слоя по моделям.

3 этап. Полученные цветковые модели на этапе 2 объединялись — 4 слоя, различных по проводимости были наложены на модель ДП. Слои по ДП, которые попали в пределы одного слоя по проводимости, сохранялись. Те слои, в пределах которых проводимость изменялась, разбивались на дополнительные зоны. Например, на слой 5 по ДП накладываются слои 2 и 3 по проводимости, поэтому на итоговой модели слой 5 будет поделен на два.

4 этап. Далее, исходя из особенностей загрузки входной модели в программу grgMax, была составлена итоговая цветная электрофизическая модель в формате .png на основе объединенных моделей на этапе 3 (рис. 4). Всего в итоговой ЭФМ было выделено 13 слоев, различных по ЭМС, идентификатором которых является цвет.

**Лучевое моделирование.** Лучевое моделирование используется для построения одиночных трасс однократных отражений по отдельным участкам

определенной выше ЭФМ, а именно на пикетах 200, 120, 80 и 20 см. Выбор данных пикетов обусловлен изменением свойств по латерали в стенке шурфа.

Для выполнения дальнейших математических операций лучевое моделирование предполагает выполнение следующих условий: среда является однородной горизонтально слоистой и на поверхность падает плоская волна.

Для построения модельной трассы однократных отражений используется сверточная модель трассы. Радарные данные  $T(t)$  представляют собой совокупность полезного сигнала  $S(t)$  и помех  $n(t)$ :

$$T(t) = S(t) + n(t). \tag{2}$$

В соответствии с теорией сигналов, полезный сигнал в приемнике георадара представляет собой результат операции свертки исходного зондирующего импульса с импульсной характеристикой среды в области времени [Владов, Судакова, 2017]:

$$T(t) = S_0(t) k(t), \tag{3}$$

где  $S_0(t)$  — зондирующий импульс,  $k(t)$  — импульсная характеристика среды.

Импульсная характеристика среды (ИХС) в случае пренебрежения сферическим расхождением и затуханием рассчитывалась по формуле коэффициента отражения с учетом проводимости, так как в разрезе присутствует ненулевая проводимость [Владов, Судакова, 2017]:

$$\left| K_{\text{отр}} \right| = \frac{\sqrt{(r_1 \cos a_1 - r_2 \cos a_2)^2 + (r_1 \sin a_1 - r_2 \sin a_2)^2}}{\sqrt{(r_1 \cos a_1 + r_2 \cos a_2)^2 + (r_1 \sin a_1 + r_2 \sin a_2)^2}}, \tag{4}$$

$$r_1 = \sqrt{\epsilon_1^2 + \frac{\sigma_1^2}{\omega}}, \tag{5}$$

$$a_1 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1 \omega}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — действительные части диэлектрические проницаемости в верхней и нижней среде,  $\sigma_1, \sigma_2$  — проводимости в верхней и нижней среде,  $\omega$  — круговая частота (400 МГц).

Двойные времена пробега вычислялись исходя из заданных мощностей Н и ЭМС ( $\bar{\varepsilon}, \bar{\sigma}$ ) в заданной выше ЭФМ. В качестве зондирующего импульса  $S_0(t)$  был принят импульс Риккера с центральной частотой  $f = 400$  МГц, рассчитанный по формуле [Giannopoulos, 1997]:

$$S_0(t) = - \left( 2\pi^2 f^2 \left( t - \frac{\sqrt{2}}{f} \right)^2 - 1 \right) e^{-\pi f \left( t - \frac{\sqrt{2}}{f} \right)^2}. \quad (8)$$

При построении ЭФМ с каждого пикета были сняты значения ДП, проводимости и мощностей слоев для составления моделей.

Используя операцию свертки ИХС и зондирующего импульса, была решена прямая задача для моделей на заданных пикетах. Полученные трассы были сопоставлены с отдельными трассами, полученными в ходе полномасштабного моделирования в grtMax. Между трассами была рассчитана разность для определения поля кратных волн, а также к анализу добавлена полевая трасса.

**Результаты и их обсуждение. Качественное сопоставление фрагмента полевой радарограммы с геологическими данными.** В задачи исследования входит повышение информативности интерпретации георадарных данных, поэтому на примере сопоставления выделенных литологических границ в стенке шурфа и осей синфазности на фрагменте радарограммы, отвечающему размерам стенки шурфа, продемонстрируем их несоответствие между собой по трем признакам: количеству, глубине и форме. Для этого на полевую радарограмму были нанесены 8 литологических границ, выделенных в стенке шурфа и границы, проведенные по осям синфазности (ОС), номера слоев, а на ПК 20 см отдельно вынесены границы, снятые с колонки по гран. составу (рис. 5, а, б, в, г). Границы по осям синфазности проводились через каждые три видимые фазы, исходя из трехфазового зондирующего импульса, который был снят с отдельной полевой трассы (рис. 5, д).

Граница I находится в ближней зоне георадара (перекрывается прямой волной). Границы II и III имеют максимальное расхождение по глубине 8–12 см с ОС 2 и 3, также отличаются от них по форме и наклону, поэтому не могут быть соотнесены между собой. Литологические границы IV, V и VI имеют расхождения по глубине с соответствующими ОС 5, 7 и 8 в пределах вертикальной разрешающей способности 5–6 см и подобны им по наклону и форме, поэтому на данном этапе их можно считать «привязанными». Границам VII и VIII не отвечают никакие ОС в силу затухания сигнала. Стоит также отметить

наличие ОС внутри слоев, которым не отвечают выделенные литологические границы: ОС 4 в слое 4 и ОС 6 в слое 5. Также ни одна ОС не совпала с промежуточными границами по гранулометрии (белые засечки на ПК 20 см).

**Качественное сопоставление геологических данных с электромагнитными измерениями в стенке шурфа.** В данном разделе важно показать, как литологические границы и границы, проведенные по осям синфазности на радарограмме соотносятся с границами изменения электромагнитных свойств. Для этого полученные значения для каждой точки измерения диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon$ ) и проводимости ( $\sigma$ ) в стенке шурфа были сохранены и оформлены в виде карт в программе Surfer, в координатах  $x, z$  ( $x$  — пикет,  $z$  — глубина) (рис. 6). Стоит обратить внимание на цветовые шкалы у карт, один цвет отвечает диапазону значений для цветовой однородности и возможности соотнесения границ изменения свойств с литологическими границами. Условно было выделено 6 диапазонов по значению ДП: 5–7 (очень низкие), 7–9 (низкие), 10–14 (средние), 15–20 (повышенные), 21–24 (высокие), более 25 — очень высокие. Также на карту ДП нанесены контуры зон, отличающихся по свойствам от окружающего их «диэлектрического слоя» с одним цветом. По проводимости выделили два диапазона: от 0,8 мСм до 1,3 мСм низкий, более 1,3 мСм — высокий.

Проведем качественный сравнительный анализ границ также по трем признакам: глубина, форма и наклон.

Литологические границы I, II, III и ОС 1, 2 находятся в области, где не наблюдается видимого (по цвету) изменения ЭМС. Границы IV, V и VI, привязанные к ним соответственно ОС 5, 7 и 8 соотносятся с границами изменения как диэлектрических, так и проводящих свойств по глубине, форме и наклону. ОС 3, 4 и 6, находящиеся внутри литологических слоев, проходят по контурам зон локального изменения ДП. Границы VII и VIII отчетливо оконтуривают слой по ДП с повышенными значениями и низкими по электропроводности, однако на этих глубинах, как было показано выше, ОС не наблюдается.

Стоит отметить, что при таком качественном сопоставлении, несмотря на знание о распределении свойств, могут быть неточности, связанные с выбором цветовой шкалы. Поэтому, для того чтобы количественно оценить влияние контрастов ЭМС в изучаемом разрезе на формирование волнового поля и конечное отражение на полевой радарограмме была решена прямая задача по построенной ЭФМ.

**Сопоставление модельной и полевой радарограмм.** На рис. 7 приведены результаты сопоставления отражений на модельной и полевой радарограммах с границами на ЭФМ, которым для удобства сравнения были присвоены различные цвета и номера. Всего было определено и приведено в соответствие между этими данными 6 границ. Модельная и полевая радарограмма приведены к од-

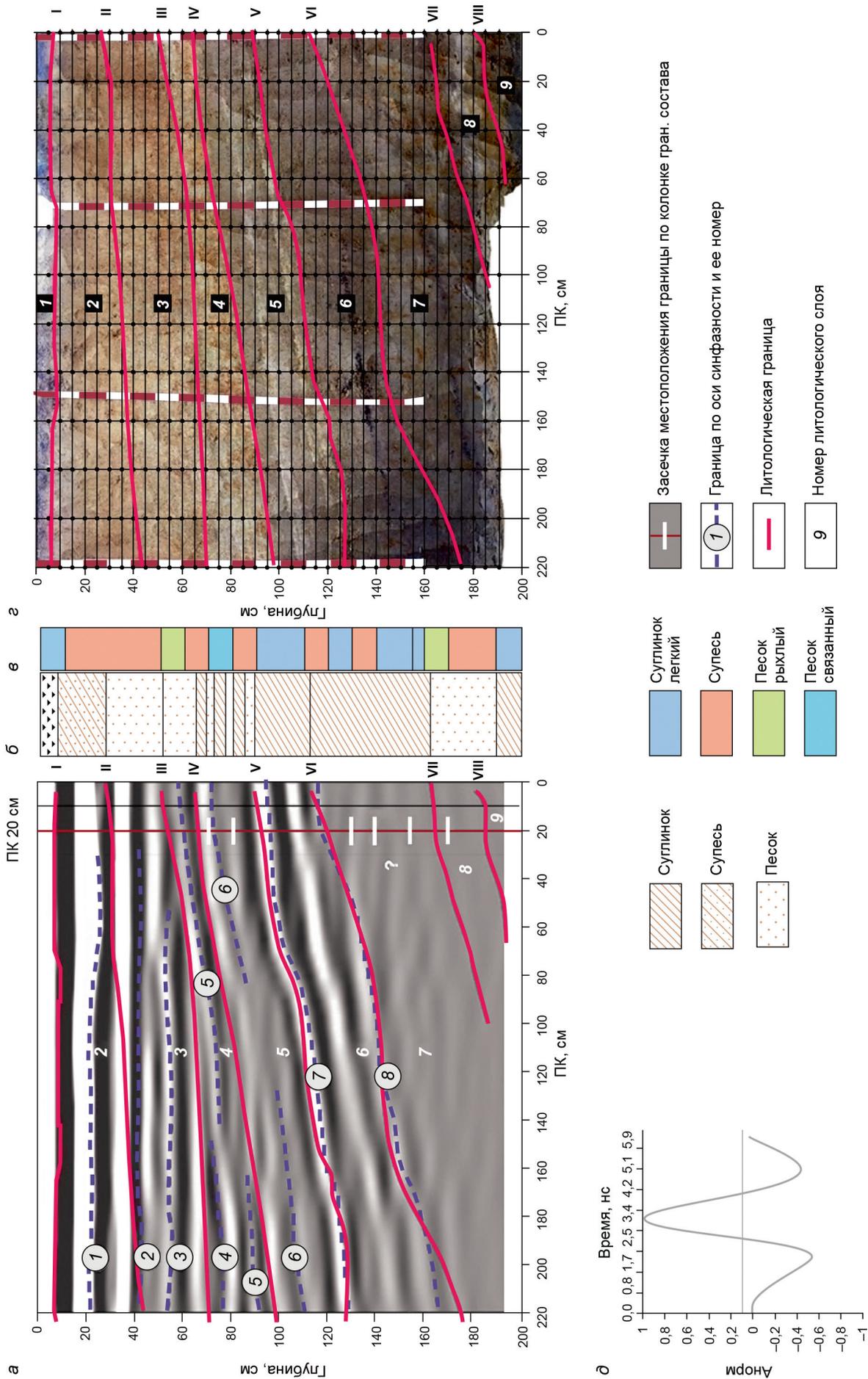


Рис. 5. Общий вид фрагмента радарограммы и стенки шурфа с геологической информацией: *а* — фрагмент полевой радарограммы по границам шурфа с наложенными литологическими границами, *б* — литологическая колонка, *в* — колонка типов пород по гранулометрии на ПК 20 см; *г* — фото стенки шурфа; *д* — трехфазовый импульс антенны ОКО

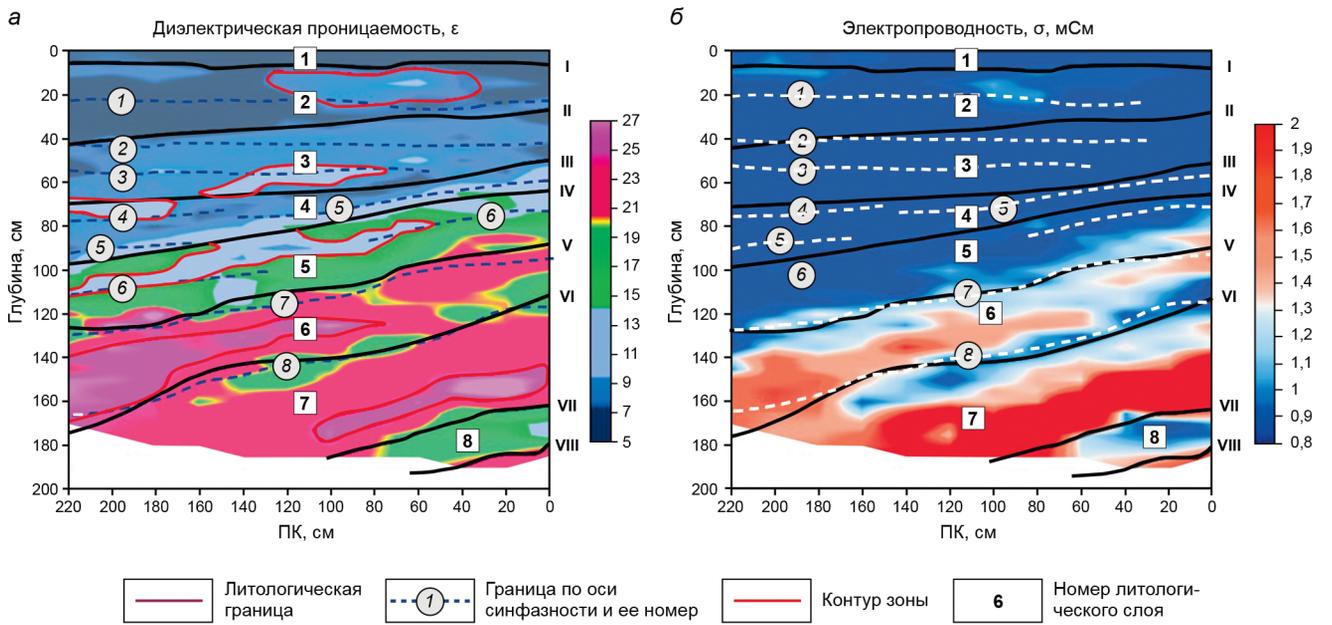


Рис. 6. Карты измеренных электромагнитных параметров: *а* — диэлектрической проницаемости, *б* — электропроводности

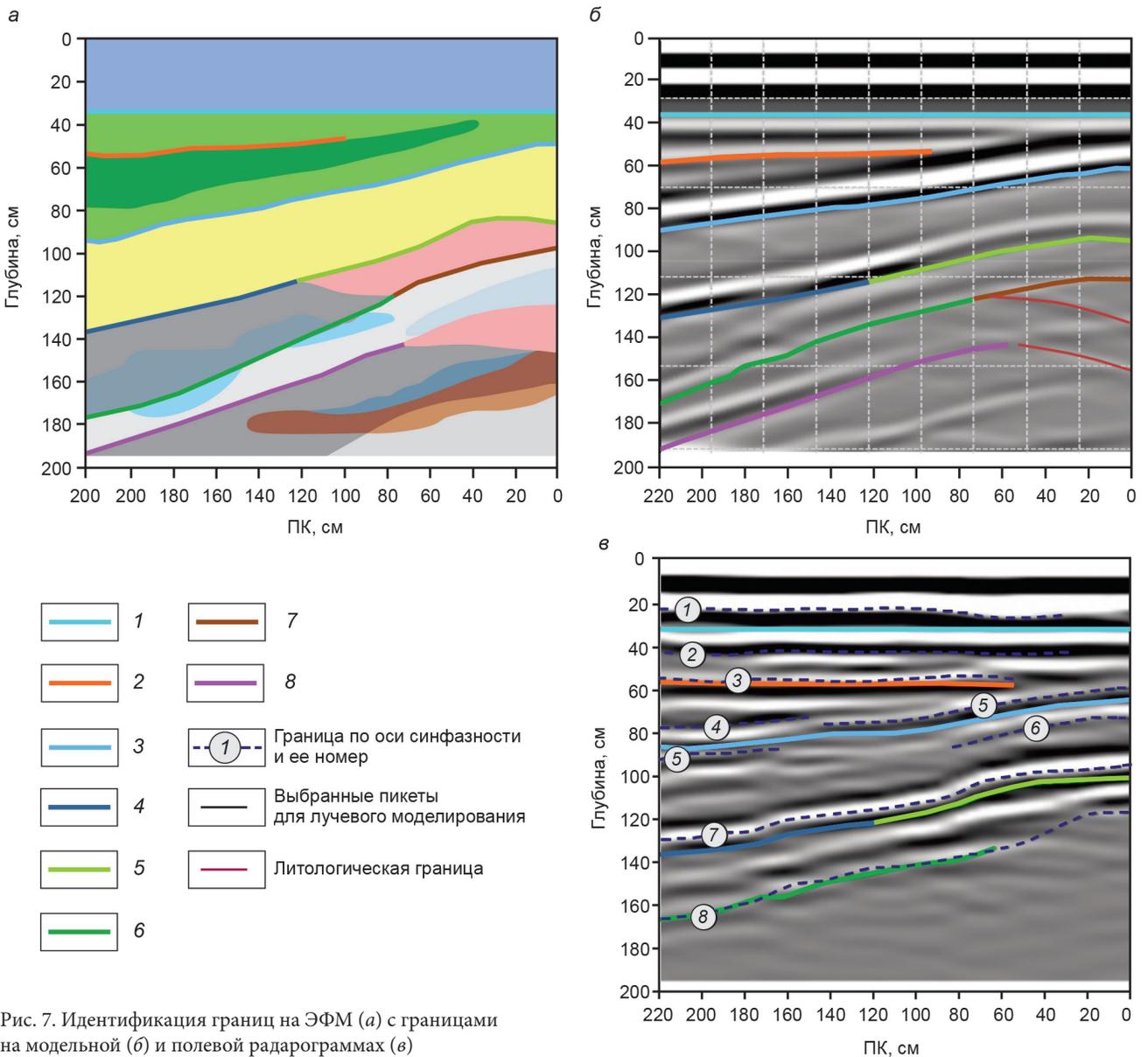


Рис. 7. Идентификация границ на ЭФМ (*а*) с границами на модельной (*б*) и полевой радарограммах (*в*)

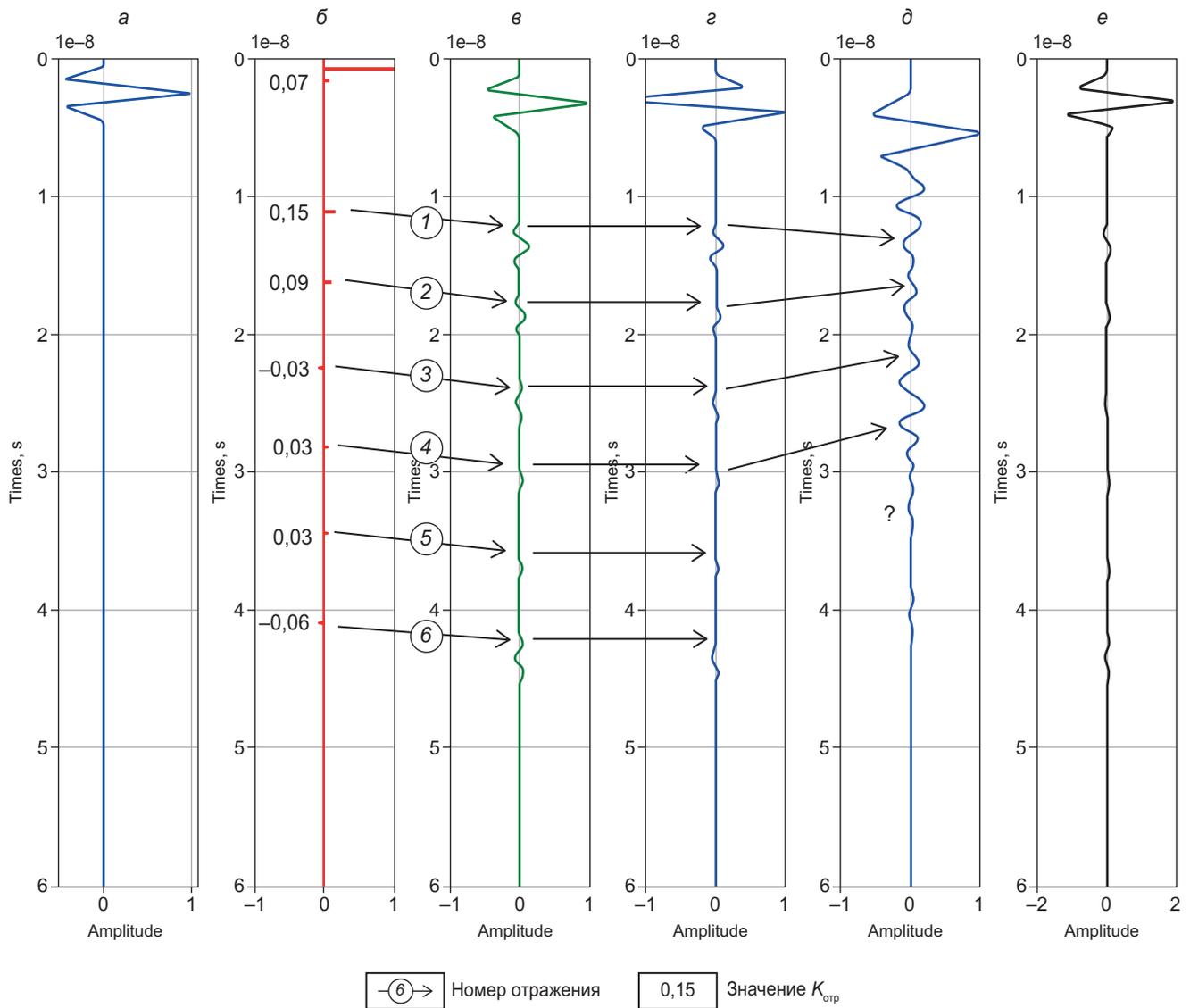


Рис. 8. Идентификация границ на ЭФМ (а) с границами на модельной (б) и полевой радарограммах (в)

ному глубинному масштабу, при переводе в глубину использовалась ДП=11.

Отмеченные границы на радарограммах проводились через каждые три фазы, все они соответствуют глубинам границ на ЭФМ, это говорит о том, что выбранное изначально для перевода эффективное значение ДП=11 при данных условиях является достаточным для привязки. Важно отметить, что ОС 5, 7 и 8 соотносятся с границами по ЭФМ, которые, как было показано выше, привязаны к литологическим границам IV, V и VI. ОС 3 соответствует границе 2 на ЭФМ, то есть находится в месте изменения ЭМС, но не литологии. ОС 4 и 6 не отвечают никакие границы на ЭФМ, что может быть связано с несовершенством выбранной модели и/или погрешностями измерений.

Далее рассмотрим результаты сравнения трасс по лучевому и полноволновому моделированию для количественной оценки контрастов ЭМС в отложениях стенки шурфа и анализа волнового поля на примере ПК 20 см (рис. 8).

Было установлено, что контрасты ЭМС отложений в стенке шурфа принимают значения от минимального  $|K_{отр \min}| = 0,03$  до максимального  $|K_{отр \max}| = 0,15$ . Границы с такой отражательной способностью проявляются на модельных и полевых данных в виде осей синфазности отраженных волн. Остатки амплитуд волнового поля, определяемые по разности, составляют от  $-0,03$  до  $0,05$ , что доказывает отсутствие поля кратных волн в данном разрезе. Изменения проводимости оказывают пренебрежимо малое влияние на значение  $K_{отр}$ . Полноволновое моделирование с затуханием подтверждает значительное уменьшение амплитуд за счет увеличения проводимости на глубинах больших 120 см, что объясняет отсутствие осей синфазности на полевых данных, несмотря на наличие там контрастов.

При сравнении с полевой трассой первое отражение трудно обнаружить, так как до 15 нс на трассе наблюдаются амплитуды, которых нет на модельных трассах. На этих же временах не происходит изменения ЭМС. Второе отражение на полевой трассе

похоже по форме импульса на модельные данные. Отражения 3 и 4 в диапазоне 20–30 нс также подобны по форме модельным, однако имеют намного большую амплитуду. Остальные отражения ниже 30 нс на полевой трассе не прослеживаются.

**Заключение.** В изучаемом песчано-глинистом разрезе диэлектрическая проницаемость изменяется от 5 до 27, а проводимость от 0,7 до 3,6 мСм. Степень изменения этих свойств на границах определяет их отражательную способность, численно равную коэффициенту отражения, который изменяется по модулю от 0,03 до 0,15. Это означает, что разрез в электрофизическом смысле является слабоконтрастным, и в волновом поле кратных электромагнитных волн не образуется. Путем решения прямой задачи было показано, что построенная на основе контрастов электромагнитных свойств ЭФМ отвечает наблюдаемому волновому полю — полевой радарограмме. Согласованность границ на ЭФМ, модельной и полевой радарограммах также означает, что эффективное значение ДП, определенное по методу ОГТ достаточно для глубинной привязки в пределах разрешающей способности георадара. Поэтому в условиях данного слабоконтрастного разреза расхождение по глубине наблюдаемых осей синфазностей на полевой радарограмме с литологическими границами связано не сколько с неточным выбором ДП при пересчете в глубины, сколько с изначальным смещением контрастов электрофизических свойств относительно границ. А различия по

количеству литологических границ и осей синфазностей объясняются наличием внутри литологических слоев диэлектрических неоднородностей, на границах которых может происходить отражение электромагнитных волн. Другая причина различий в количестве — наличие ненулевой проводимости в разрезе, которая приводит к затуханию сигнала и, как было показано при сопоставлении трасс, отсутствию осей синфазностей ниже 120 см при величине контрастов свойств 0,06.

Информативность интерпретации была повышена за счет сведений об электромагнитных свойствах отложений изучаемого разреза и использования инструмента моделирования. Это можно показать на примере: литологические границы IV, V и VI можно уверенно приводить в соответствие с осями синфазности на радарограмме, так как они приурочены к границам изменения электромагнитных свойств; остальные же оси синфазности будет некорректно привязывать к другим литологическим границами, так как они приурочены к контрастам свойств, не связанных с изменением литологии.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность Рязанцеву П.А., Шилову П.М., Матасову В.М., Шашериной Л.В., Лобачевой Д.М., Юрченко А.П., Мироненко И.В., Федину А.В. за помощь в создании материалов статьи.

**Финансирование.** Работы произведены за счет гранта Российского научного фонда № 22 77-00049, <https://rscf.ru/project/22-77-00049/>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений: Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.

Калинкевич А.А., Кутуза Б.Г., Марчук В.Н. и др. Многочастотная радиолокация «Эффективной» влажности почвы // Радиолокация. 2018. С. 193–208.

Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. Акад. наук СССР. Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. 192 с.

Пузаченко Ю.Г. Математические методы в экологических и географических исследованиях. М.: Академия, 2004. 416 с.

Сизова Т.М. Статистика: учебное пособие. СПб.: СПб НИУ ИТМО, 2013. 176 с.

Снопков С.В., Давыденко Ю.А. Использование геофизических методов при поиске и изучении памятников древней металлургии железа в Приольхонье (Западный берег Байкала) // Геоархеология и археологическая минералогия. 2019. С. 35–39.

Bobrov N., Titov A., Krekhov A. GPR studies of the thermocline on fresh-water lakes // 19<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. 2019. P. 829–838.

Botha G., Bristow C., Porat N., et al. Evidence for dune reactivation from GPR profiles on the Maputaland coastal plain, South Africa // Geological Society, London, Special Publications. Vol. 211. 2003. P. 29–46.

Bradford J., Johnson C., Brosten T., et al. Imaging thermal stratigraphy in freshwater lakes using georadar // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34.

Finlay P.I., Parry N.S., Proskin S.A., Mickle R.J. An Overview of Ice Profiling Using Ground Penetrating Radar (GPR) // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 2008.

Giannopoulos A. The Investigation of Transmission-Line Matrix and Finite-Difference Time-Domain Methods for the Forward Problem of Ground Probing Radar. 1997. PhD thesis, University of York.

Krylov S., Bobrov N., Pryakhina G., et al. Peculiarities of distribution and transformation of water in the Keret' River tidal estuary // Russian Meteorology and Hydrology. Vol. 39. 2014. 677–684.

Robinson D.A. Jones S.B., Wraith J.M., Friedman S.P. A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry // Vadose Zone Journal. 2003. P. 444–475.

Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines // Water Resources Research. 1980. Vol. 16, No. 3. P. 574–582.

Van Dam R.L., Schlager W., Dekkers M.J., Huisman J.A. Iron oxides as a cause of GPR reflections // Geophysics. 2002. Vol. P. 536–45.

Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. GprMax: Open-source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. 2016. Vol. 209. P. 160–173.

Статья поступила в редакцию 10.03.2025, одобрена после рецензирования 12.03.2025, принята к публикации 28.08.2025