

Георадиолокационные модели массива горных пород россыпных месторождений золота умеренной климатической зоны Якутии

Л.Л. Федорова , Г.А. Куландин, С.Д. Шамаев

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск,
Российская Федерация
 lar-fed-90@rambler.ru

Резюме: Физико-геологическое моделирование помогает при разработке методик полевых георадиолокационных работ, при выборе методов обработки и выработке интерпретационных признаков волновых картин. Построение георадиолокационных моделей разреза верхней части массива горных пород россыпных месторождений умеренной зоны Якутии выполнено на основе анализа горно-геологических условий россыпных месторождений р. Аллах-Юнь, р. Большой Куранах, руч. Муравьевский и данных комплексных геофизических исследований на участке вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии. Основные построенные георадиолокационные модели массива мерзлых пород россыпных месторождений представляют собой: горизонтально-однородную среду рыхлых отложений, характерную для промерзшего дражного котлована, а также дражный котлован в летнее время и мерзлые рыхлые отложения с включением слоя сильнольдистых пород. Анализ построенных моделей массива горных пород дражного полигона показал, что на результаты георадиолокации существенно влияет наличие водных объектов ввиду замедления скорости распространения электромагнитной волны в воде. Наличие ледяного покрова зимой также вносит много помех в виде кратных сигналов-переотражений из-за высокой диэлектрической контрастности границы «лед–вода». Все это затрудняет обработку данных и требует разработки специализированных методик для проведения георадиолокационных измерений и новых подходов при обработке данных, полученных в условиях дражного полигона.

Ключевые слова: россыпные месторождения, дражный котлован, георадиолокация, георадиолокационные модели массива пород, радарограмма, оси синфазности, электрофизические свойства горных пород

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР №122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Федорова Л.Л., Куландин Г.А., Шамаев С.Д. Георадиолокационные модели массива горных пород россыпных месторождений золота умеренной климатической зоны Якутии. *Горная промышленность*. 2025;(4S):87–93.
<https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-87-93>

GPR models of the rock mass of the placer gold deposits in the temperate climatic zone of Yakutia

L.L. Fedorova , G.A. Kulyandin, S.D. Shamaeva

N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
 lar-fed-90@rambler.ru

Abstract: Physical-geological modeling supports the development of field ground penetrating radar (GPR) methods, selection of data processing techniques, and identification of interpretative features in the GPR wave patterns. GPR models of the upper part of the rock mass in the placer gold deposits located in the temperate zone were developed based on an analysis of the geological and mining conditions of the Allah-Yun River, the Bolshoy Kuranakh River, and the Muravyevsky Stream deposits, as well as data of the integrated geophysical surveys conducted along the main gas pipeline in southern Yakutia. The resulting models represent a horizontally homogeneous environment of loose sediments typical of a frozen dredge pit, a dredge pit under Summer conditions, and frozen loose sediments containing a layer of ice-rich rocks. Analysis of the built models of the rock mass at the dredge site showed that the results of the GPR survey are significantly affected by the presence of water bodies due to decreased velocity of electromagnetic wave propagation in water. The presence of an ice cover in winter time also causes a lot of interference in the form of multiple signal reflections due to the high dielectric contrast of the ice-water boundary. All of these

make data processing difficult and requires the development of dedicated methods to perform the GPR surveys as well as new approaches to processing the data collected at the test site.

Keywords: placer deposits, dredge pit, ground penetrating radar, GPR, GPR models of rock mass, radargram, wave pattern, electrophysical properties of rocks

Acknowledgements: The study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No. 0297-2021-0020, EGISU NIOCTR No.122011800086-1) using instruments that belong to the Shared core facilities of the Federal Research Center, Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Fedorova L.L., Kulyandin G.A., Shamaev S.D. GPR models of the rock mass of the placer gold deposits in the temperate climatic zone of Yakutia. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):87–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-87-93>

Введение

Термин «физико-геологическая модель» (ФГМ) был введен в употребление в 1987 г. Г.С. Вахромеевым и А.Ю. Давыденко [1]. Физико-геологическое моделирование помогает при разработке методик полевых георадиолокационных работ, при выборе методов обработки и выработке интерпретационных признаков волновых картин. По аналогии с В.Н. Страховым, М. Калькара, М. Каракатерра, мы определяем ФГМ как трехуровневую систему [2; 3]. Ее базовый уровень – геологическая модель, обобщенно описывающая состав, структуру и геометрию изучаемого объекта и вмещающей среды. Далее строится петрофизическая модель, характеризующая пространственное распределение электрофизических и геологических свойств [4]. Завершает конструкцию радарограмма – результат компьютерного, физического или натурного моделирования, отражающая характер георадиолокационных волновых полей, включая интенсивность, морфологию, аномалии и помехи.

Синтетические радарограммы, получаемые при компьютерном моделировании, существенно отличаются от натурных радарограмм своей излишней «идеальностью». Поэтому все разрабатываемые модели необходимо сопоставлять с аналогичными натурными георадиолокационными разрезами.

В данной статье предлагается рассмотреть модели, выработанные на основе данных георадиолокации на россыпных месторождениях золота умеренной климатической зоны Якутии, которые в основном разрабатываются дражным способом.

Материалы и методы

Построение георадиолокационных моделей разреза верхней части массива горных пород россыпных месторождений умеренной зоны выполнено на основе анализа природно-климатических и горно-геологических условий территории Юго-Восточной и Южной Якутии. Мощность торфов на месторождении р. Аллах-Юнь в Юго-Восточной части Якутии изменяется от 2,7 м в пойме до 10 м в пределах пойменных террас. Мощность песков колеблется от 0,4 до 5,2 м. Размер фракций галечного материала не превышает 10 см, а валунов 20–30 см, изредка 50 см. Мощность деятельного слоя колеблется от 0,2–0,3 м до 3,0–3,5 м. Аллювиальные отложения долины р. Большой Куранах в Южной Якутии представлены серыми песками и валунно-галечными образованиями, мощностью от 4 до 12 м. Погребенные отложения, подстилая современные образования пойменной части и террас, слагают борта долины,

поднимаясь над поймой на 10–20 м. Содержание крупнообломочного материала (классом +10 мм) достигает 30% при содержании иллисто-глинистой фракции 40–60 % с незначительными включениями (до 2–4%) валунов размером 2–4 м. Геологические условия участка вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии приближены к характеристикам р. Большой Куранах, т.к. они находятся в одном районе. А по данным инженерно-геологического бурения геологическое строение на рассматриваемом участке трассы в интервале глубин 0–10 м характеризуется наличием аллювиальных отложений – чередованием слоев песка пылеватого, мелкого и средней крупности, а также галечникового грунта с песчаным заполнителем [5].

В умеренной зоне, как и в субарктической [6], предпочтительно применение электромагнитных методов геофизики для оценки строения и геокриологического состояния массива. По результатам рассмотрения натурных данных георадиолокации [7; 8] и электроразведки [9; 10], а также лабораторных экспериментов, проведенных сотрудниками лаборатории георадиолокации ИГДС СО РАН [11], подготовлена таблица с обобщенными электрофизическими свойствами горных пород умеренной климатической зоны (табл. 1).

Первая рассмотренная модель представляет собой четырехслойную горизонтально-однородную среду рыхлых отложений: почвенно-растительный слой (в том числе торф), пески с гравием, золотосодержащие галечники с щебнем и алевролит. Модель построена по данным георадиолокационных исследований на месторождении россыпного золота руч. Муравьевский. Вторая модель представляет собой четырехслойную среду, характерную для промерзшего дражного котлована месторождения россыпного золота р. Аллах-Юнь: лед, вода, пески, коренные породы. Третья модель также описывает дражный котлован, но в летнее время, и состоит из трех слоев: вода, пески, коренные породы. Эта модель построена по участку скального выхода, глубокопогребенной россыпи р. Большой Куранах [12]. Четвертая модель – двухслойная среда: почвенно-растительный слой, мерзлые рыхлые отложения с включениями слоя сильнольдистых пород. Модель построена по данным комплексных геофизических исследований на участке вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии [13].

Моделирование георадиолокационных данных выполнено в программной среде gprMax с применением метода FDTD (конечных разностей во временной области), широко используемого для решения задач

Таблица 1
 Обобщенные электрофизические свойства горных пород
 умеренной климатической зоны Якутии

Table 1
 Generalized electrophysical properties of rocks in the temperate
 climate zone of Yakutia

№	Название породы	Мощность Н, м	У.Э.С. (ρ), Ом \cdot м	Диэлектрическая проницаемость, ϵ'
1	Торф мерзлый	0–1	$0,6 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^3$	6–8
2	Песок льдистый (льдистость 50%)	1–3,5	$3 \cdot 10^3 \dots 39 \cdot 10^3$	3,5–6
3	Песок мерзлый	4–10	$0,6 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^3$	3,5–6
4	Песок талый	1–6	$0,1 \cdot 10^3 \dots 0,15 \cdot 10^3$	5–12
5	Песок талый водонасыщенный	6–10	$0,1 \cdot 10^2 \dots 0,4 \cdot 10^2$	12–25
6	Песок с гравием	2–5	$0,4 \cdot 10^3 \dots 0,5 \cdot 10^3$	8–10
7	Галечник с щебнем	5–8	$1,5 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$	6–8
8	Алевролит	8–10	$1,5 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^3$	5–7
9	Лед	0–1	$10^5 \dots 106$	3–4
10	Песчано-гравийные галечные отложения	0–5	$4 \cdot 10^2 \dots 6 \cdot 10^2$	10–13
11	Вода	1–3	60–80	80–85
12	Глинистые сланцы	5–8	$10^3 \dots 2 \cdot 10^3$	5–7
13	Суглинки	4–8	$10^2 \dots 2 \cdot 10^2$	23–28
14	Доломит	2–12	$4,5 \cdot 10^3 \dots 5,5 \cdot 10^3$	4–6
15	Сильнольдистые пески	1–4	$2,5 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^4$	3–5
16	Мелкозернистые пески	1–8	$10^3 \dots 2 \cdot 10^3$	4–7

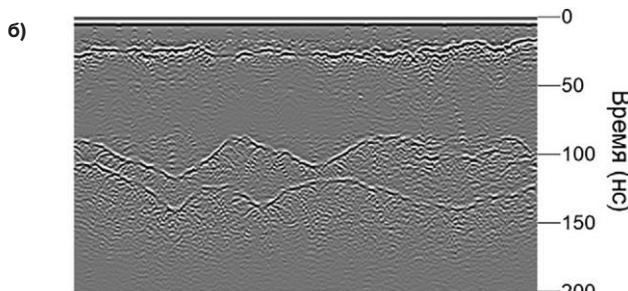
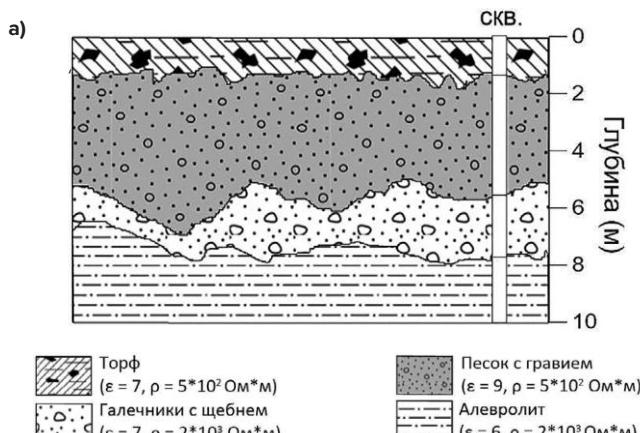


Рис. 1
 Георадиолокационная модель
 рыхлых отложений
 месторождения россыпного
 золота умеренной зоны:
 а – схема геологического
 разреза; б – синтетическая
 радарограмма

Fig. 1
 A GPR model of loose
 sediments at a placer gold
 deposit in the temperate zone:
 а – a geological cross-section;
 б – a synthetic radargram

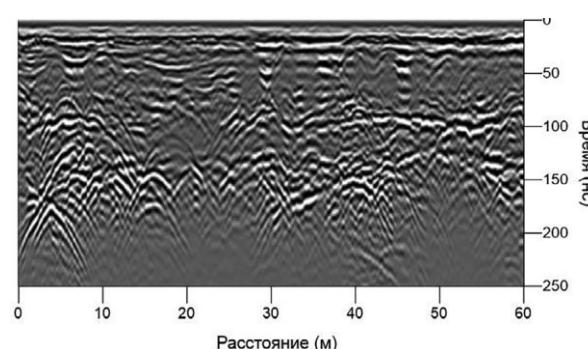


Рис. 2
 Радарограмма
 с месторождения россыпного
 золота руч. Муравьевский

Fig. 2
 A radargram of the placer gold
 deposit at the Muravyevskiy
 Stream

а также свойства вмещающей среды. Результатом моделирования стали детальные георадиолокационные модели, включающие схему геологического разреза с распределением электрофизических свойств и соответствующую синтетическую радарограмму.

Результаты

Модель рыхлых отложений месторождения россыпного золота

Первой рассмотрена модель рыхлых отложений месторождения россыпного золота. Слоистая структура массива рыхлых отложений (рис. 1, а) отображается на синтетической радарограмме протяженными осями синфазности отраженных волн (рис. 1, б). При однородных свойствах горных пород искривление формы осей синфазности связано только с рельефом соответствующих слоев.

Исходными данными для этой модели послужили результаты геофизических исследований на месторождении россыпного золота руч. Муравьевский (рис. 2). Данные георадиолокации при интерпретации опирались на информацию по скважинам с буровой линии Л44. В опорных точках

электродинамики [14]. В качестве исходных параметров задавались геометрия исследуемой области, размеры включенных объектов и их электрофизические характеристики (диэлектрическая проницаемость, проводимость),

около скважин выполнены параметрические зондирования по методу общей глубинной точки, что позволило рассчитать среднюю скорость электромагнитных волн в перекрывающей толще (торф и почвенно-растительный слой): $V = 0,113$ м/нс, а далее определить значение вещественной части диэлектрической проницаемости – $\epsilon' = 6$. По составу пород подобраны табличные значения УЭС (ρ) для каждого слоя. До глубины 2 м прослежен почвенно-растительный слой с торфом ($\epsilon' = 7$, $\rho = 5 \cdot 10^2$ Ом*м). Под ним, с 2 до 5 м – слой песка с гравием ($\epsilon' = 9$, $\rho = 5 \cdot 10^2$ Ом*м). Далее на глубине от 5–8 м – золотосодержащий пласт галечников с щебнем ($\epsilon' = 7$, $\rho = 2 \cdot 10^3$ Ом*м), залегающий на коренных породах – алевролитах ($\epsilon' = 6$, $\rho = 2 \cdot 10^3$ Ом*м). Все породы в разрезе находятся в талом состоянии. На основе полученных данных построен геологический разрез (см. рис. 1, а), согласно которому проведено компьютерное моделирование и получена синтетическая радарограмма (см. рис. 1, б) для георадара с центральной частотой 250 МГц. Данные компьютерного моделирования и натурные данные георадиолокации имеют схожую волновую картину для границ слоев. Ожидаемо, на натурных данных больше различных отражений и волн дифракции, связанных с неоднородностью массива горных пород (см. рис. 2).

Модель дражного котлована зимой

Вторая георадиолокационная модель построена на основе анализа данных, полученных в зимнее время при изучении дражного котлована, подготовленного в прошлый летний полевой сезон на месторождении россыпного золота р. Аллах-Юнь. Геологический разрез модели включает:

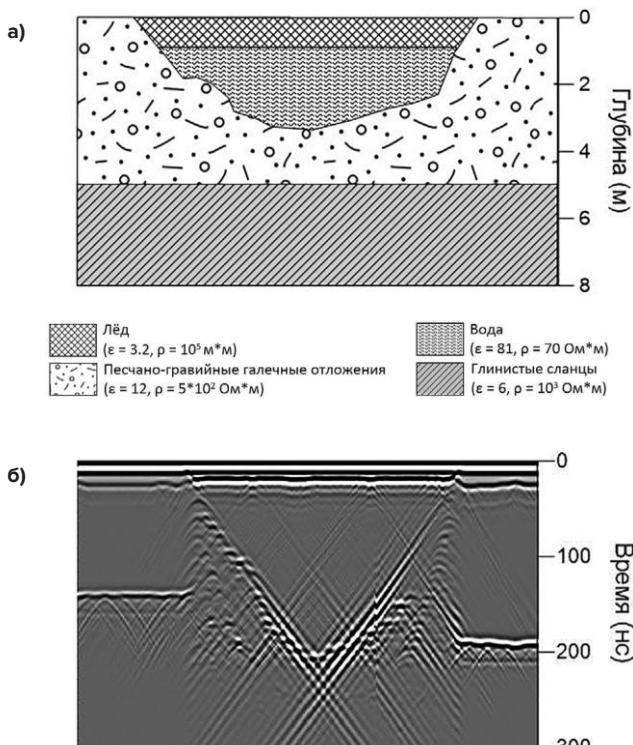


Рис. 3
Георадиолокационная модель дражного котлована зимой:
а – схема геологического разреза;
б – синтетическая радарограмма

Fig. 3
A GPR model of a dredge pit in Winter time:
a – a geological cross-section;
b – a synthetic radargram

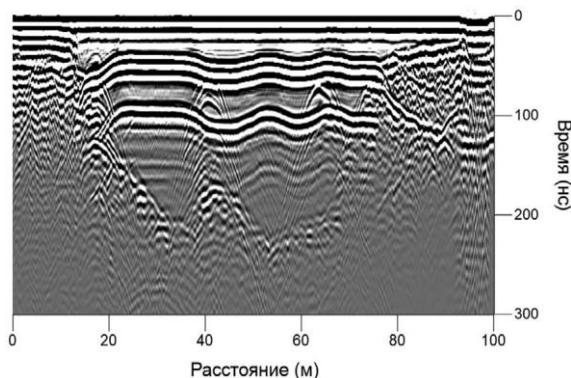


Рис. 4
Радарограмма с дражного котлована месторождения россыпного золота р. Аллах-Юнь

Fig. 4
A radargram of a dredge pit at the placer gold deposit at the Allah-Yun River

ледомощностью 0,8 м ($\epsilon' = 3,2, \rho = 10^5$ Ом*м), толщу воды мощностью 3 м ($\epsilon' = 81, \rho = 70$ Ом*м), золотосодержащие пески, представленные песчано-гравийно-галечными отложениями ($\epsilon' = 12, \rho = 5 \cdot 10^2$ Ом*м), которые залегают на коренных породах – глинистые сланцы ($\epsilon' = 6, \rho = 10^3$ Ом*м) (рис. 3, а). Моделирование волнового поля выполнено на частоте 250 МГц с базой между передающей и приемной антеннами 0,63 м (георадар «ОКО-2»). На синтетической радарограмме в верхней части разреза прослеживаются оси синфазности зондирующих сигналов (рис. 3, б). Чуть ниже на них накладываются высокоамплитудные (контрастные) сигналы, отраженные от границы «лед–вода». От поверхности бортов дражного котлована образовались дифрагированные волны, они пересекаются в центре радарограммы и затрудняют ее интерпретацию в этой части. Регулярность сигналов и достаточная контрастность на общем волновом поле позволяют выполнить достоверную визуализацию границы кровли коренных пород лишь по краям от котлована в диапазоне 150–200 нс.

На натурных данных с дражного котлована наблюдается схожая волновая картина, ее особенностью можно назвать кратные отражения от границы «лед–вода», которые представлены контрастными протяженными оси синфазности (рис. 4). Как и на синтетической радарограмме, они маскируют отражения от кровли коренных пород по всей протяженности котлована. Но борта и дно котлована отчетливо прослеживаются по волнам дифракции.

Модель дражного котлована летом

Георадиолокационная модель дражного котлована летом построена по данным, полученным в теплое время года на месторождении р. Б-Куранах (рис. 5, а). Волновое поле синтетической радарограммы модели заметно выделяется своей однородностью по сравнению с другими моделями из-за большого дражного котлована, заполненного водой (рис. 5, б).

Высокоамплитудные волны дифракции сформировали волновую картину бортов котлована, в которую входят также и переотражения сигналов. Дно котлована прослеживается по осям синфазности, образованным на границе «вода–суглинки». Сигналы на этой границе слабые из-за затухания электромагнитных волн в толще воды, а также от того, что суглинки пропитаны водой и имеют

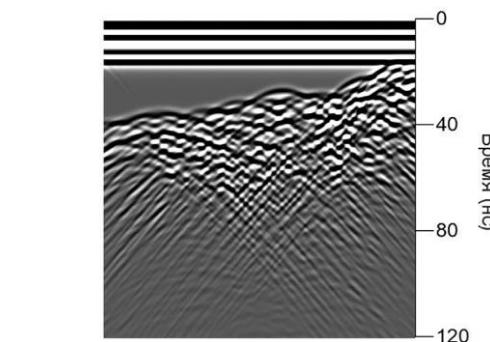
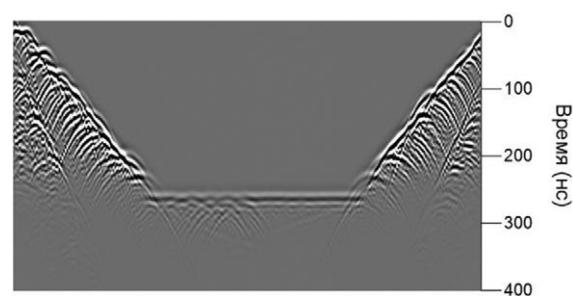
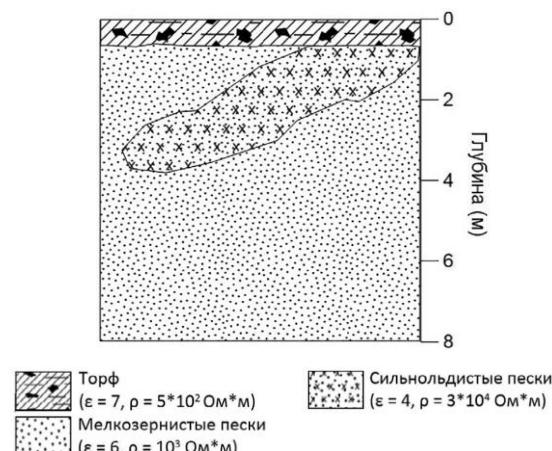
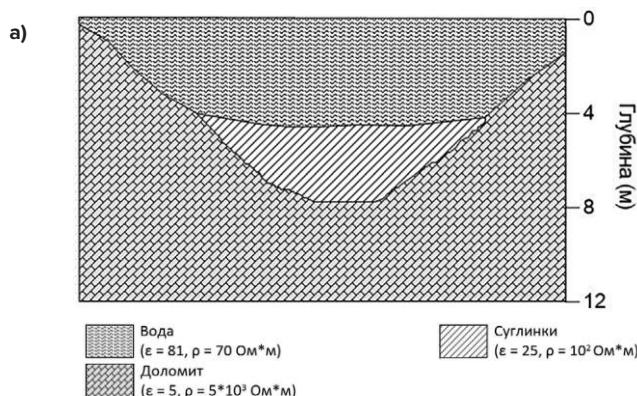


Рис. 5
Георадиолокационная модель дражного котлована летом:
а – схема геологического разреза;
б – синтетическая радарограмма

Fig. 5
A GPR model of a dredge pit in Summer time:
a – a geological cross-section;
b – a synthetic radargram

Рис. 7
Георадиолокационная модель рыхлых отложений с включениями слоя сильнольдистых пород:
а – схема геологического разреза;
б – синтетическая радарограмма

Fig. 7
A GPR model of loose sediments containing a layer of ice-rich rocks:
a – a geological cross-section;
b – a synthetic radargram

не относится непосредственно к какому-либо месторождению, тем не менее она описывает встречающиеся в этом районе особые геологические условия (рис. 7, а).

Как видно на синтетической радарограмме модели, зондирующий сигнал и слой торфа (включая почвенно-растительный слой) ($\epsilon' = 7, \rho = 5 \cdot 10^2 \text{ Ом}^* \text{м}$) образовали чередующуюся последовательность высокомощных осей синфазности, которые не позволяют выявить верхнюю границу мелких и пылеватых песков ($\epsilon' = 6, \rho = 10^3 \text{ Ом}^* \text{м}$) (рис. 7, б). Они имеют достаточно равномерное по ампли-

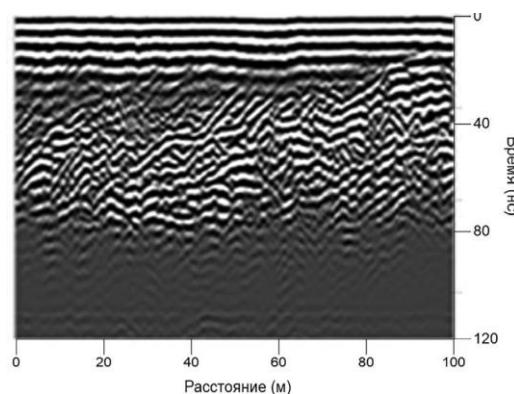


Рис. 6
Радарограмма с дражного котлована месторождения россыпного золота р. Б-Куранах

Fig. 6
A radargram of a dredge pit at the placer gold deposit at the Bolshoy Kuranakh River

высокое значение вещественной части диэлектрической проницаемости. Выход коренных пород по дну котлована не просматривается на синтетической радарограмме, так же как и на натурных данных (рис. 6). Увеличение затухания электромагнитных волн с глубиной на натурных данных заметнее по слабеющим отражениям от бортов котлована.

Модель рыхлых отложений с включениями слоя сильнольдистых пород

Модель мерзлых рыхлых отложений с включениями слоя сильнольдистых пород построена по данным комплексных геофизических исследований на участке вдоль магистрального газопровода в Южной Якутии. И хотя она

тудам волновое поле, а потому на их фоне хорошо прослеживаются сильнольдистые пески ($\epsilon' = 4$, $\rho = 3 \cdot 10^4$ Ом \cdot м), волновое поле которых сформировано большим количеством хаотично распределенных волн дифракции. Нижняя граница этой зоны не имеет четких границ и визуально определяется по снижению интенсивности амплитуд, максимум которых сосредоточен в вершинах гипербол. Полученная синтетическая радарограмма хорошо описывает реальные данные с участка магистрального трубопровода в Южной Якутии (рис. 8). Можно отметить, что в волновом поле радарограммы натурных данных кроме волн дифракции в зоне льдистости присутствуют протяженные оси синфазности, вероятно, образованные прожилками льда.

Заключение

На основе анализа результатов численного, физического моделирования и натурных измерений, с учетом электрофизических свойств горных пород, региональных климатических условий построены георадиолокационные модели верхней части геологического разреза, достоверно

отражающие особенности строения и состояния массива горных пород россыпных месторождений умеренной климатической зоны Якутии.

Анализ построенных моделей массива горных пород дражного полигона показал, что на результаты георадиолокации существенно влияет наличие водных объектов ввиду замедления скорости распространения электромагнитной волны в воде. Наличие ледяного покрова зимой также вносит много помех в виде кратных сигналов-реотражений, из-за высокой диэлектрической контрастности границы «лед–вода». Все это затрудняет обработку данных и требует разработки специализированных методик для проведения георадиолокационных измерений и новых подходов при обработке данных, полученных в условиях дражного полигона.

Вклад авторов

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors' contribution

All the authors have made equivalent contributions to the publication.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Рыскин М.И. Физико-геологическое моделирование как основа геологической интерпретации комплекса геофизических данных. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле*. 2014;14(1):87–96. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2014-14-1-87-96>
Riskin M.I. Physical and geological modeling as a basis of geological interpretation of geophysical data complex. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*. 2014;14(1):87–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2014-14-1-87-96>
2. Страхов В.Н. Основные идеи и методы извлечения информации из данных гравитационных и магнитных наблюдений. В кн.: Кузиванов В.А. (ред.) *Теория и методика интерпретации гравитационных и магнитных аномалий*. М.: ИФЗ; 1979. С. 146–269.
3. Calcaro M., Caricaterra M. CO₂ dipole moment: A simple model and its implications for CO₂-rock interactions. *Minerals*. 2023;13(1):87. <https://doi.org/10.3390/min13010087>
4. Lopes J.A.G., Medeiros W.E., Oliveira J.G., Santana F.L., Araújo R.E.B., Bruna V. et al. Three-dimensional characterization of karstic dissolution zones, fracture networks, and lithostratigraphic interfaces using GPR cubes, core logs, and petrophysics: Implications for thief zones development in carbonate reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*. 2023;150:106126. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106126>
5. Ермаков С.А., Бураков А.М., Заудальский И.И., Панищев С.В. *Совершенствование геотехнологий открытой разработки месторождений Севера*. Якутск: Изд-во СО РАН; 2004. 370 с.
6. Федорова Л.Л., Соколов К.О., Прудецкий Н.Д., Шамаев С.Д. Георадиолокационные модели массива горных пород субарктической зоны Якутии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(12-2):129–140. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_122_0_129
Fedorova L.L., Sokolov K.O., Prudetskii N.D., Shamaev S.D. GPR models of rock massif of the subarctic zone of the Yakutia. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(12-2):129–140. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_122_0_129

7. Лещанский Ю.И., Дробышев А.И. Электрические параметры песчано-глинистых грунтов в диапазоне УКВ и СВЧ в зависимости от влажности и температуры. М.: Информсвязь; 1995. 26 с.
8. Martel R., Castellazzi P., Gloaguen E., Trépanier L., Garfias J. ERT, GPR, InSAR, and tracer tests to characterize karst aquifer systems under urban areas: The case of Quebec City. *Geomorphology*. 2018;310:45–56. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.03.003>
9. Alfuqara D., Anderson N. Geophysical site assessment of soil and the rock structure in karst terrain using 2D and 3D mapping of noninvasive electrical resistivity tomography – southwestern of MO, USA. *Arabian Journal of Geosciences*. 2023;16:103. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11196-5>
10. Нерадовский Л.Г. Прогноз диэлектрической проницаемости по электрическому сопротивлению песчаников южной Якутии. *Геофизика*. 2025;(2):40–48. <https://doi.org/10.34926/geo.2025.27.16.006>
Neradovskii L.G. Prediction of dielectric constant by electrical resistance of sandstones of South Yakutia. *Geophysics Journal*. 2025;(2):40–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.34926/geo.2025.27.16.006>
11. Федорова Л.Л., Фёдоров М.П., Свинобоев А.С. Физическое моделирование георадиолокационного мониторинга криогенных процессов в массиве рыхлых горных пород. *Успехи современного естествознания*. 2024;(11):106–111. <https://doi.org/10.17513/use.38340>
Fedorova L.L., Fedorov M.P., Svinoboev A.S. Physical modeling of gpr monitoring of cryogenic processes in a loose rock massif. *Advances in Current Natural Sciences*. 2024;(11):106–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.38340>
12. Федорова Л.Л., Куляндин Г.А. Опыт применения метода георадиолокации при эксплуатационной разведке россыпных месторождений золота Якутии. *Успехи современного естествознания*. 2018;(11-1):160–165. <https://doi.org/10.17513/use.36921>
Fedorova L.L., Kulyandin G.A. Experience in applying the gpr method in the exploration of placer gold deposits of Yakutia. *Advances in Current Natural Sciences*. 2018;(11-1):160–165. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.36921>
13. Savvin D.V., Fedorova L.L., Kulyandin G.A., Soloviev E.E. GPR studies of the permafrost conditions of the main pipeline area in Western Yakutia. In: *17th conference and exhibition engineering and mining geophysics 2021, Gelendzhik, April 26–30, 2021*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152087>
14. Majchrowska S., Giannakis I., Warren C., Giannopoulos A. Modelling arbitrary complex dielectric properties – an automated implementation for gprMax. In: *2021 11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Valletta, Malta, December 1–4, 2021*. IEEE; 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/IWAGPR50767.2021.9843152>

Информация об авторах

Федорова Лариса Лукинична – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории георадиолокации, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-5002-6140>; e-mail: lar-fed-90@rambler.ru

Куляндин Гаврил Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории георадиолокации, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7029-0777>; e-mail: kgavriliu@yandex.ru

Шамаев Семен Дмитриевич – старший инженер лаборатории георадиолокации, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0006-5542-2632>; e-mail: sha.sd@inbox.ru;

Information about the authors

Larisa L. Fedorova - Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, GPR Laboratory, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5002-6140>; e-mail: lar-fed-90@rambler.ru;

Gavril A. Kulyandin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7029-0777>; e-mail: kgavriliu@yandex.ru

Semen Shamaev – Senior Engineer, GPR Laboratory, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0006-5542-2632>; e-mail: sha.sd@inbox.ru

Article info

Received: 02.07.2025

Revised: 13.08.2025

Accepted: 21.08.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.07.2025

Поступила после рецензирования: 13.08.2025

Принята к публикации: 21.08.2025