

## Интерпретация результатов радиоволнового просвечивания методами машинного обучения

И. М. Алёшин<sup>1,2,a</sup>, И. В. Малыгин<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН,  
Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
им. академика Н. П. Лаверова РАН,  
Россия, 163000, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 23

E-mail: <sup>a</sup> ima@ifz.ru, <sup>b</sup> malygin.iv@gmail.com

Получено 13.05.2019, после доработки — 05.07.2019.

Принято к публикации 08.07.2019.

В настоящий момент значительно возросла глубина работ по разведке кимберлитовых тел и рудных месторождений. Традиционные геологические методы поиска оказались неэффективными. Практически единственным прямым методом поиска является бурение системы скважин до глубин, которые обеспечивают доступ к вмещающим породам. Из-за высокой стоимости бурения возросла роль межскважинных методов. Они позволяют увеличить среднее расстояние между скважинами без существенного снижения вероятности пропуска кимберлитового или рудного тела. Метод радиоволнового просвечивания особенно эффективен при поиске объектов, отличающихся высокой контрастностью электропроводящих свойств. Физическую основу метода составляет зависимость распространения электромагнитной волны от проводящих свойств среды распространения. Источником и приемником электромагнитного излучения является электрический диполь. При измерениях они размещаются в соседних скважинах. Расстояние между источником и приемником известно. Поэтому, измерив величину уменьшения амплитуды электромагнитной волны при ее распространении между скважинами, можно оценить коэффициент поглощения среды. Породы с низким электрическим сопротивлением соответствуют высокому поглощению радиоволн. Поэтому данные межскважинных измерений позволяют оценить эффективное электрическое сопротивление породы. Обычно источник и приемник синхронно погружаются в соседние скважины. Измерение величины амплитуды электрического поля в приемнике позволяет оценить среднее значение коэффициента затухания на линии, соединяющей источник и приемник. Измерения проводятся во время остановок, приблизительно каждые 5 м. Расстояние между остановками значительно меньше расстояния между соседними скважинами. Это приводит к значительной пространственной анизотропии в распределении данных. При проведении разведочного бурения скважины покрывают большую площадь. Наша цель состоит в построении трехмерной модели распределения электрических свойств межскважинного пространства на всем участке по результатам совокупности измерений. Анизотропия пространственного распределения измерений препятствует использованию стандартных методов геостатистики. Для построения трехмерной модели коэффициента затухания мы использовали один из методов теории машинного обучения — метод ближайших соседей. В этом методе коэффициент поглощения в заданной точке определяется его значениями для  $k$  ближайших измерений. Число  $k$  определяется из дополнительных соображений. Влияния анизотропии пространственного распределения измерений удается избежать, изменив пространственный масштаб в горизонтальном направлении. Масштабный множитель  $\lambda$  является еще одним внешним параметром задачи. Для выбора значений параметров  $k$  и  $\lambda$  мы использовали коэффициент детерминации. Для демонстрации процедуры построения трехмерного образа коэффициента поглощения мы воспользовались данными межскважинного радиоволнового просвечивания, полученные на одном из участков в Якутии.

Ключевые слова: межскважинное зондирование, радиоволновое просвечивание, машинное обучение, kNN-алгоритм

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН и ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексных исследований Арктики РАН» (тема АААА-А18-118012490072-7).

UDC: 550.8.05; 004.85

## Machine learning interpretation of inter-well radiowave survey data

I. M. Aleshin<sup>1,2,a</sup>, I. V. Malygin<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth Russian Academy of Sciences,  
10 Bolshaya Grouzinskaya st., Moscow, 123242, Russia

<sup>2</sup>Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research Russian Academy of Sciences,  
23 Severnaya Dvina embankment, Arkhangelsk, 163000, Russia

E-mail: <sup>a</sup> ima@ifz.ru, <sup>b</sup> malygin.iv@gmail.com

Received 13.05.2019, after completion — 05.07.2019.

Accepted for publication 08.07.2019.

Traditional geological search methods going to be ineffective. The exploration depth of kimberlite bodies and ore deposits has increased significantly. The only direct exploration method is to drill a system of wells to the depths that provide access to the enclosing rocks. Due to the high cost of drilling, the role of inter-well survey methods has increased. They allows to increase the mean well spacing without significantly reducing the kimberlite or ore body missing probability. The method of inter-well radio wave survey is effective to search for high contrast conductivity objects. The physics of the method based on the dependence of the electromagnetic wave propagation on the propagation medium conductivity. The source and receiver of electromagnetic radiation is an electric dipole, they are placed in adjacent wells. The distance between the source and receiver is known. Therefore we could estimate the medium absorption coefficient by the rate of radio wave amplitude decrease. Low electrical resistance rocks corresponds to high absorption of radio waves. The inter-well measurement data allows to estimate an effective electrical resistance (or conductivity) of the rock. Typically, the source and receiver are immersed in adjacent wells synchronously. The value of the of the electric field amplitude measured at the receiver site allows to estimate the average value of the attenuation coefficient on the line connecting the source and receiver. The measurements are taken during stops, approximately every 5 m. The distance between stops is much less than the distance between adjacent wells. This leads to significant spatial anisotropy in the measured data distribution. Drill grid covers a large area, and our point is to build a three-dimensional model of the distribution of the electrical properties of the inter-well space throughout the whole area. The anisotropy of spatial distribution makes hard to the use of standard geostatistics approach. To build a three-dimensional model of attenuation coefficient, we used one of machine learning theory methods, the method of nearest neighbors. In this method, the value of the absorption coefficient at a given point is calculated by  $k$  nearest measurements. The number  $k$  should be determined from additional reasons. The spatial distribution anisotropy effect can be reduced by changing the spatial scale in the horizontal direction. The scale factor  $\lambda$  is one yet external parameter of the problem. To select the parameters  $k$  and  $\lambda$  values we used the determination coefficient. To demonstrate the absorption coefficient three-dimensional image construction we apply the procedure to the inter-well radio wave survey data. The data was obtained at one of the sites in Yakutia.

Keywords: inter-well scanning, radio wave survey, machine learning, kNN-algorithm

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2019, vol. 11, no. 4, pp. 675–684 (Russian).

This work was supported by budget projects of the Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, and the Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Russian Academy of Sciences (project number AAAA-A18-118012490072-7).

## Введение

Ввиду того что в Западной Якутии практически исчерпаны месторождений алмазов, непосредственно доступных с поверхности, работы по поиску кимберлитовых тел осуществляются на территориях, где традиционные геолого-геофизические исследования оказались неэффективными [Шмаков, 2017]. Для площадей, перекрытых осадочными породами, а также в местах развития траппов, единственным прямым методом поиска кимберлитов является бурение по сети. Чтобы снизить стоимость работ, расстояние между скважинами желательнее увеличить, однако это увеличивает риск пропуска мелких кимберлитовых трубок. Чтобы этого избежать, используются методы межскважинного зондирования, в частности радиоволновые методы [Кеворкянц и др., 2005]. Методика радиоволнового просвечивания (РВП) была разработана в середине прошлого века (см. [Петровский, 1971]) и активно применяется в настоящее время [Истратов и др., 2006], причем не только при поиске кимберлитовых трубок [Толстов и др., 2018], рудных [Кузнецов, 2008] и нефтяных [Истратов и др., 2000] месторождений и пр., но и для мониторинга состояния природных объектов [Черепанов, 2017] и технологических процессов [Истратов и др., 2009].

Идея метода заключается в оценке затухания электромагнитной волны при ее прохождении через межскважинное пространство. Источник и приемник электромагнитного поля помещаются в соседние скважины для измерения ослабления электрического поля. Породы, обладающие более низким сопротивлением, характеризуются более высоким поглощением радиоволн, поэтому пространственное распределение коэффициента поглощения при фиксированной частоте пропорционально распределению электропроводности среды [Петровский, 1971]. Таким образом, радиоволновое просвечивание является частным случаем электроразведки (см. монографию [Жданов, 1986]). Его отличия от классических методов электроразведки, применяемых на этапе первоначального поиска кимберлитов (см., например, [Поспеева и др., 2004]), проявляются в диапазоне используемых частот, мощности сигнала, взаимным расположением приемника и источника и другими параметрами используемых электромагнитных волн.

При веерном способе измерений (см. рис. 1, *а*) положение излучателя изменяется с заданным шагом. На каждой стоянке приемник, находящийся в другой скважине, фиксирует амплитуду электрического поля по всему рабочему интервалу глубин. После этого источник перемещается в следующую позицию. Перемещение источника и приемника осуществляется дискретно, с заданным шагом. Такая схема измерений позволяет получить детальную картину электрических свойств межскважинного пространства в плоскости, проходящей через обе скважины. Совместная интерпретация совокупности полученных таким образом разрезов позволяет получить трехмерный образ электрических свойств среды [Кузнецов, 2012; Mishra et al., 2019].

При веерной съемке число измерений равно  $n^n$ , где  $n$  — количество стоянок источника в скважине. Поэтому на практике при радиоволновой съемке зачастую ограничиваются синхронным погружением источника и приемника в соседние скважины (рис. 1, *б*). В этом случае количество измерений пропорционально  $n$ , что существенно снижает объем измерений, но вместе с тем информативность измерений также снижается. Фактически все, что мы можем получить при такой схеме измерений, это среднее значение кажущегося коэффициента затухания, соответствующего середине отрезка, соединяющего источник и приемник. Такое упрощение схемы измерений приводит к тому, что в этом случае для описания процесса распространения электромагнитных волн бессмысленно использовать модель среды с трехмерной неоднородностью, так как она будет излишне детальной. Достаточно ограничиться простой плоскостной моделью с небольшим числом слоев. Однако и такая оценка параметров межскважинного пространства потребует значительного объема численных расчетов. В данной работе при моделировании мы ограничимся простейшей моделью, основанной на распределении поля электрического диполя

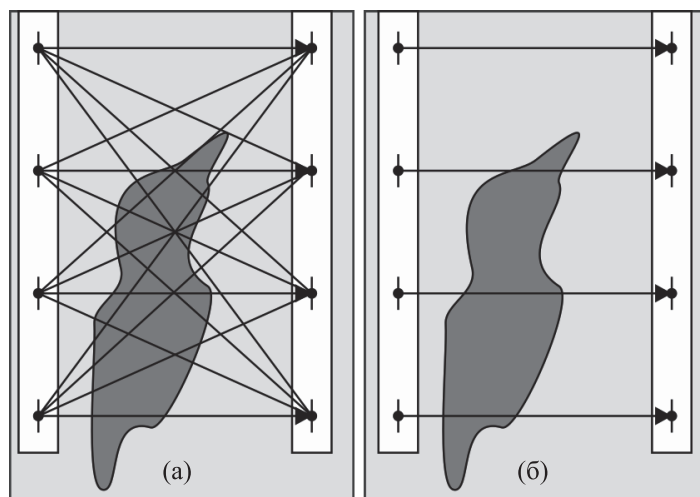


Рис. 1. Схемы измерений, используемых в радиоволновых исследованиях: а) асинхронная, положение источника фиксируется, приемник перемещается по всему рабочему диапазону с заданным шагом; затем источник смещается в следующую позицию и измерения повторяются и т. д.; б) синхронные измерения, источник и приемник перемещаются по скважине одновременно

в однородном пространстве. Это позволяет при обработке данных измерений избежать трудоемких вычислений и дает нам возможность сосредоточиться на процедуре построения трехмерного распределения электрических свойств среды.

Так как при синхронных измерениях томографический метод становится неприменим, нам необходимо использовать принципиально иную интерполяционную процедуру. В работе [Aleshin, Zhandalinov, 2009] горизонтальные сечения среды строятся на основе регрессионной модели — методом кригинга [Isaaks, Srivastava, 1989]. Параметры интерполяции выбираются исходя из согласования ошибок интерполяции с погрешностью задания входных данных. Однако при построении действительно трехмерной модели непосредственное применение регрессионного подхода невозможно из-за экстремальной анизотропии распределения исходных данных. Кроме того, даже в двумерном случае решение получается излишне сглаженным, в то время как наша задача как раз состоит в получении максимально контрастного образа.

Одна из возможных альтернатив состоит в использовании методов машинного обучения, в которых процедура интерполяции основана на специфическом анализе исходных данных, который обычно называют процессом обучения системы. В задачах анализа упорядоченных данных, к которым относится и наша задача, традиционным подходом является построение моделей на основе глубоких нейросетевых архитектур, например сверточных или рекуррентных [Ordez, Roggen, 2016; Николенко и др., 2018]. Однако для качественного обучения подобных моделей необходимо значительно большее количество исходных данных, чем имеется в нашем распоряжении. Альтернативным способом учесть в модели пространственную структуру объектов является применение метрических классификаторов, решающие правила которых основаны на вычислении расстояний между объектами данных [Hastie et al., 2009]. Ниже описана процедура построения трехмерного распределения коэффициента затухания на основе метрического классификатора. В качестве реализации был использован алгоритм  $k$ -Nearest Neighbors ( $k$  ближайших соседей, или сокращенно  $k$ NN). Метод  $k$ NN относится к классу так называемых «ленивых» алгоритмов, которые не требуют длительного предварительного обучения [Журавлев и др., 2006; Altman, 1992]. Собственно, обучение сводится к расчету матрицы расстояний от заданной точки до всех входных данных. Это наиболее простой и в то же время эффективный метод анализа данных.

## Метод и данные

В этой работе для иллюстрации мы используем данные АО «АЛРОСА» — результаты радиоволнового просвечивания, выполненного на одном из якутских участков. Не имея возможности привлечь дополнительные данные, относящиеся к участку, мы ограничились построением трехмерной модели его электропроводящих свойств. Поэтому в дальнейшем речь будет идти о расчете пространственного распределения коэффициента поглощения среды между скважинами. Для анализа межскважинных измерений необходимо выбрать модель пространственного изменения электрического поля волны, излучаемой источником. Как уже отмечалось во введении, имеющиеся у нас данные получены в результате синхронных измерений. Фактически это означает, что мы можем оценить лишь среднее значение коэффициента поглощения среды вдоль прямой, соединяющей источник и приемник. Ограничимся самой простой моделью распространения волны, определяемой формулой поля излучения электрического диполя в однородной изотропной среде:

$$E = E_0 \exp(-q/R)/R \sin \theta.$$

Здесь  $E$  — полярная компонента электрического поля,  $E_0$  — амплитуда излучаемой волны,  $R$  — расстояние от источника. При синхронных измерениях источник и приемник находятся приблизительно на одной глубине, поэтому полярный угол можно положить равным  $\pi/2$ . Тогда искомым коэффициентом поглощения равен

$$q = -\ln(RE/E_0).$$

Обозначим через  $Q = \{q_n\}$  набор исходных данных — значения кажущегося коэффициента затухания, измеренные в  $N$  точках. Координаты точек  $\vec{r}_n = \{x_n, y_n, z_n\}$  соответствуют середине отрезка, соединяющего источник и приемник. Здесь  $x, y$  определяют положение точки в горизонтальной плоскости,  $z$  — глубина, отсчитываемая от уровня моря. В алгоритме kNN значение величины  $q$  в произвольной точке  $\vec{r} = \{x, y, z\}$  определяется формулой

$$q(\vec{r}) = \sum_{k=1}^K w_k(\vec{r}, \vec{r}_k) q_k, \quad \sum_{k=1}^K w_k = 1, \quad (1)$$

суммирование проводится по  $K$  точкам, ближайшим к  $\vec{r}$ . Число  $K$  является свободным параметром алгоритма (гиперпараметр), требующим дополнительного определения. Иногда вместо числа соседей в качестве гиперпараметра используют радиус сферы с центром в точке  $\vec{r}$ . Тогда соседними считаются все точки, находящиеся внутри сферы. В качестве расстояния  $R$  в нашем случае естественно выбрать евклидово расстояние между точками:

$$R(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}.$$

Величина  $w_k(\vec{r}, \vec{r}_k)$  — весовая функция, зависящая от расстояния текущей точки  $\vec{r}$  до соответствующей точки с заданным значением, в качестве которой обычно используют величину, обратно пропорциональную расстоянию:

$$w_k(\vec{r}, \vec{r}_k) \sim 1/R(\vec{r}, \vec{r}_k).$$

Если пространственное расположение точек не учитывать, то вес одинаков для всех точек  $w_k = 1/K$ .

Как уже отмечалось во введении, распределение данных, полученных методом РВП, сильно анизотропно: шаг по глубине имеет величину 5 м при длине скважины порядка 500 м, в то время как расстояние между ближайшими скважинами составляет приблизительно 200 м. Это



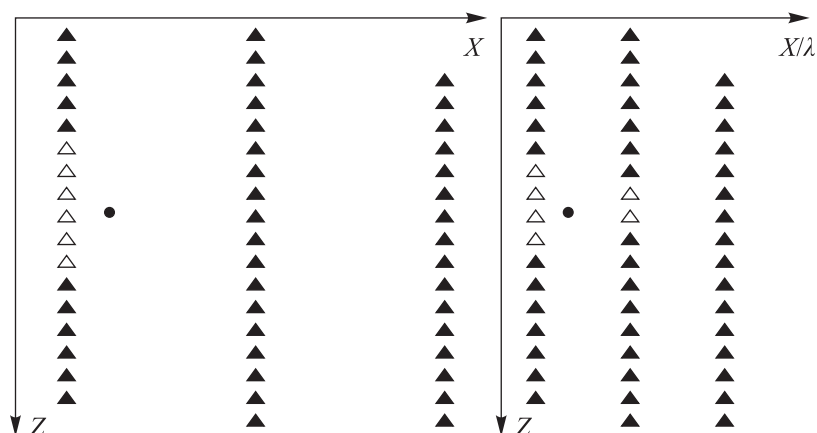


Рис. 2. Влияние масштабного коэффициента  $\lambda$  на распределение ближайших точек. Особенность пространственного распределения данных приводит к тому, что практически для всех точек пространства ближайшими оказываются данные, относящиеся к одной группе измерений. Масштабирование горизонтальных осей позволяет исправить эту ситуацию

приводит к тому, что при построении трехмерной модели мы не можем использовать классические методы геостатистики [Isaaks, Srivastava, 1989]. Чтобы воспользоваться методом ближайших соседей, также требуется его модификация. Чтобы нивелировать разницу в горизонтальном и вертикальном масштабе, переопределим метрику, введя безразмерный масштабный множитель  $\lambda$ :

$$R(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 / \lambda^2 + (y_1 - y_2)^2 / \lambda^2 + (z_1 - z_2)^2}. \quad (2)$$

Можно ожидать, что подходящий выбор значения параметра позволит компенсировать анизотропию данных (см. рис. 2), однако критерий, позволяющий сделать этот выбор, отсутствует. Поэтому масштабный множитель  $\lambda$ , наряду с числом соседей  $K$ , является еще одним гиперпараметром задачи.

Для определения гиперпараметров мы использовали метод перекрестной проверки, который, наряду с методом отложенной выборки, является стандартным в теории машинного обучения. Исходные данные разбиваются на  $M$  групп (в нашем случае  $M = 5$ ). Каждая из этих групп поочередно устраняется из процедуры «обучения» и используется для проверки. Оценку качества решения мы производили по коэффициенту детерминации — доле дисперсии зависимой переменной, объясненной моделью. Коэффициент детерминации определяется формулами

$$\begin{aligned} \kappa(K, \lambda) &= 1/M \sum_{m=1}^M \kappa^{(m)}(K, \lambda), \\ \kappa^{(m)}(K, \lambda) &= 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N/M} (q_i^{(m)} - q(\vec{r}_i; K, \lambda))^2}{\sum_{i=1}^{N/M} (q_i^{(m)} - \bar{q}^{(m)})^2}, \\ \bar{q}^{(m)} &= \sum_{i=1}^{N/M} q_i^{(m)}. \end{aligned}$$

Интерполянт  $q(\vec{r}_i; K, \lambda)$  вычисляется по формуле (1) с усовершенствованной метрикой (2), но без учета исключенных данных. Коэффициент детерминации был рассчитан нами на сетке  $1 \leq K \leq 25$ ,  $1 \leq \lambda \leq 25$  с единичным шагом по каждому из параметров. Результат расчетов приведен на рис. 3. Полученное распределение имеет вид, типичный для задач многопараметрической оптимизации. Для выбора значений гиперпараметров мы использовали уровень значений

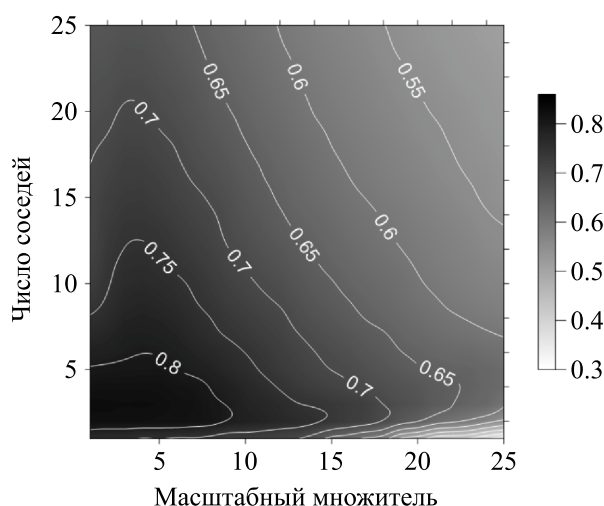


Рис. 3. Значения коэффициента детерминации  $\kappa(K, \lambda)$ , рассчитанные на сетке параметров. В качестве приемлемых значений гиперпараметров  $K, \lambda$ , выбрана область, в которой  $\kappa$  превышает значение 0.7. Для построения модели выбраны значения, определяемые точкой пересечения медианы и гипотенузы треугольника, образованного осями координат и прямой, приближающей изолинию  $\kappa = 0.7$

коэффициента  $\kappa = 0.7$ , что соответствует приблизительно 80 % корреляции модели и исходных данных. Выбранные нами значения гиперпараметров  $K = 11$  и  $\lambda = 10$  соответствуют пересечению медианы треугольника, образованного осями координат и прямой, аппроксимирующей 70-процентный уровень значений коэффициента детерминации. После того как значения гиперпараметров определены, задача построения образа сводится к вычислению интересующей нас величины (в нашем случае — коэффициента затухания) по формулам (1) и усовершенствованной метрики (2) в узлах трехмерной решетки. Построение модели, расчет горизонтальных и вертикальных сечений реализованы на языке программирования Python (<https://www.python.org>) с использованием коллекции пакетов Scikit-learn (<https://scikit-learn.org>).

На рис. 4 приведены одно вертикальное и два горизонтальных сечения модели. Из рисунка видно, что построенная модель позволяет локализовать объекты, чьи горизонтальные размеры существенно меньше расстояния между скважинами. В качестве примера можно привести три области повышенного значения коэффициента затухания, расположенных на глубине  $-560$  м, горизонтальные координаты  $X = 2950$ ,  $X = 4750$  и  $X = 5150$  метров. Для наглядности, на рис. 5 приведены вертикальные сечения, соответствующие этим линиям, на которых соответствующие области также отчетливо видны.

## Заключение

Использованный нами метод kNN позволяет построить трехмерную модель проводимости среды между скважин даже при использовании синхронной схемы измерений. Влияние анизотропии распределения данных можно исключить, если модифицировать пространственную метрику, определяющую расстояние между данными. Это достигается введением коэффициента, который изменяет масштаб в горизонтальном направлении. Помимо прочего, использованный подход позволяет получить достаточно контрастное изображение неоднородных областей, что позволяет выделить неоднородности, чьи геометрические размеры меньше расстояния между скважинами.

Отметим также, что процесс построения модели не зависит от физической модели, использованной для интерпретации измерений. Уточнение физической модели процесса распростра-

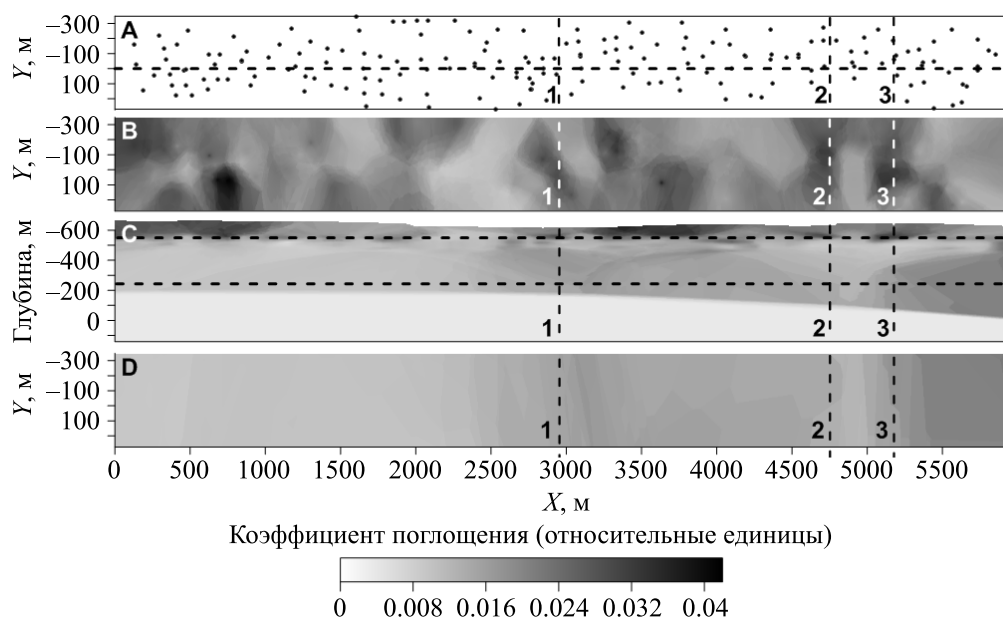


Рис. 4. Горизонтальные (панели В, D) и вертикальное (панель С) сечения модели. Глубина отложена от уровня моря, положение горизонтальных осей согласовано с геометрией участка. Расположение вертикального разреза соответствует линии  $Y = 0$  на схеме расположения скважин (панель А). Горизонтальные сечения, построенные на панелях В, D, соответствуют глубинам  $Z = -560$  и  $Z = -250$  метров (черная и белая пунктирные линии на вертикальном разрезе)

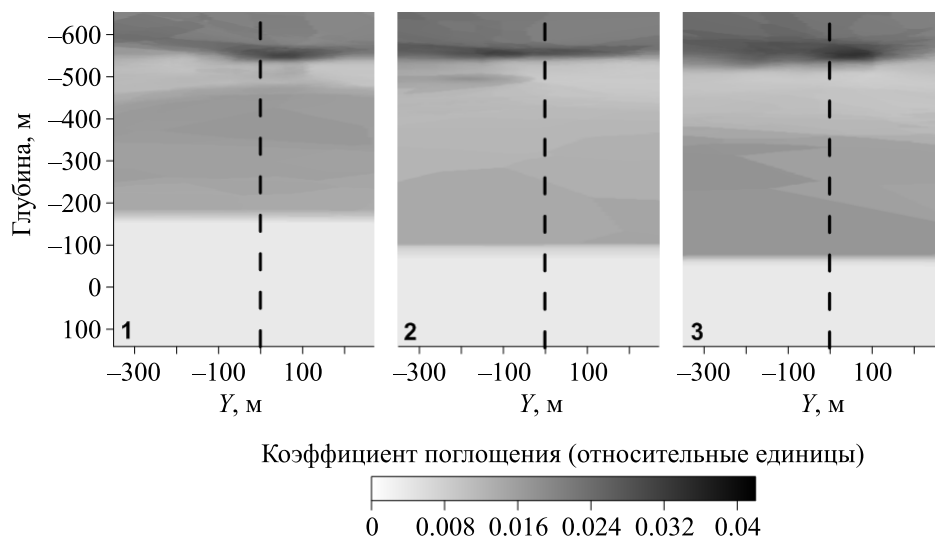


Рис. 5. Вертикальные сечения модели, соответствующие плоскостям  $X = 2950$ ,  $X = 4750$  и  $X = 5150$  метров. На предыдущем рисунке их положения отмечены вертикальными пунктирными линиями. На рисунках отчетливо видны компактные области повышенного значения коэффициента затухания с горизонтальными размерами порядка 100 м

нения радиоволн между скважинами позволит улучшить качество построения образа. Модель может быть улучшена, если привлечь дополнительные данные (геологические, сейсмические, магнитные) для их совместной интерпретации.



**Список литературы (References)**

- Жданов М. С.* Электроразведка. — М.: Недра, 1986. — 316 с.  
*Zhdanov M. S.* Electrorazvedka [Electrical survey]. — Moscow: Nedra, 1986. — 316 p. (in Russian).
- Журавлев А. А., Рязанов В. В., Сенько О. В.* Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения. — М.: Фазис, 2006. — 2006 с.  
*Zhuravlev A. A., Ryazanov V. V., Sen'ko O. V.* Raspoznavaniye. Matematicheskiye metody. Programmnyaya sistema. Prakticheskiye primeneniya [Recognition. Mathematical methods. Software system. Practical applications]. — Moscow: Fazis, 2006. — 2006 p. (in Russian).
- Истратов В. А., Лысов М. Г., Чибрикин И. В., Матяшов С. В.* Радиоволновая геоинтроскопия (РВГИ) межскважинного пространства на месторождениях нефти // Геофизика. — 2000. — Спецвыпуск. — С. 59–68.  
*Istratov V. A., Lysov M. G., Chibrikin I. V., Matyashov S. V.* Radiovolnovaya geointroskopiya (RVGI) mezhskvazhinnogo prostranstva na mestorozhdeniyakh nefi [Radio wave geointroscopy (RWGI) of inter-well space in oil fields] // Geofizika. — 2000. — Specvyпуск. — P. 59–68 (in Russian).
- Истратов В. А., Скринник А. В., Перекалин С. О.* Новая аппаратура для радиоволновой геоинтроскопии горных пород в межскважинном пространстве «РВГИ-2005» // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2006. — № 1. — С. 37–43.  
*Istratov V. A., Skrinnik A. V., Perekalin S. O.* Novaya apparatura dlya radiovolnoy geointroskopii gornyx porod v mezhskvazhinnom prostranstve "RVGI-2005" // Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki [New equipment for radio wave geointroscopy of rocks in the interwell space "RWGI-2005"]. — 2006. — No. 1. — P. 37–43 (in Russian).
- Истратов В. А., Колбенков А. В., Перекалин Е. В., Лях С. О.* Радиоволновой метод мониторинга технологических процессов в межскважинном пространстве // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2009. — Т. 14. — С. 59–68.  
*Istratov V. A., Kolbenkov A. V., Perekalin E. V., Lyah S. O.* Radiovolnoy metod monitoringa texnologicheskix processov v mezhskvazhinnom prostranstve [Radio wave monitoring method of technological processes in the interwell space] // Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle. — 2009. — Vol. 14. — P. 59–68 (in Russian).
- Кеворкянц С. С., Абрамов В. Ю., Ковалев Ю. Д.* Скважинный радиоволновой комплекс при поисках кимберлитовых трубок в Западной Якутии // Геофизика. — 2005. — Т. 3. — С. 56–64.  
*Kevorkyanc S. S., Abramov V. Yu., Kovalev Yu. D.* Skvazhinnyj radiovolnoy kompleks pri poiskakh kimberlitovykh trubok v Zapadnoy Yakutii [Well radio wave complex for searching for kimberlite pipes in Western Yakutia] // Geofizika. — 2005. — Vol. 3. — P. 56–64 (in Russian).
- Кузнецов Н. М.* Опыт применения радиоволновой геоинтроскопии межскважинного пространства для разведки золотомедного месторождения // Разведка и охрана недр. — 2008. — № 12. — С. 27–29.  
*Kuznetsov N. M.* Opyt primeneniya radiovolnoy geointroskopii mezhskvazhinnogo prostranstva dlya razvedki zolotomednogo mestorozhdeniya [Experience of the radiowave geointroscopy of the interwell space for the exploration of a gold-copper deposit] // Razvedka i ohrana neдр. — 2008. — No. 12. — P. 27–29 (in Russian).
- Кузнецов Н. М.* Способ 3D-обработки данных радиоволнового просвечивания межскважинного пространства // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2012. — Т. 1. — С. 240–246.  
*Kuznetsov N. M.* Sposob 3D-obrabotki dannykh radiovolnogo prosvechivaniya mezhskvazhinnogo prostranstva [The 3D method of processing the data of radio wave scanning of the interwell space] // Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle. — 2012. — Vol. 1. — P. 240–246 (in Russian).
- Николенко С. И., Кадурин А. А., Архангельская Е. О.* Глубокое обучение. — СПб.: Питер, 2018. — 479 с.  
*Nikolenko S. I., Kadurin A. A., Arxangel'skaya E. O.* Glubokoe obuchenie [Deep learning]. — Saint Petersburg: Piter, 2018. — 479 p. (in Russian).
- Поспеева Е. В., Матросов А. В., Манаков В. А.* Геоэлектрическая неоднородность земной коры в связи с кимберлитовым магматизмом юга якутской алмазонасной провинции // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Геология. — 2004. — Т. 1. — С. 137–147.  
*Pospeeva E. V., Matrosov A. V., Manakov V. A.* Geoelektricheskaya neodnorodnost zemnoy kory v svyazi s kimberlitovym magmatizmom yuga yakutskoy alamazonosnoy provintsii [Geoelectric heterogeneity of the Earth's crust in connection with the kimberlite magmatism of the south of the Yakut diamondreach province] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geologiya. — 2004. — Vol. 1. — P. 137–147 (in Russian).

- Петровский А. Д.* Радиоволновые методы в подземной геофизике. — М.: Недра, 1971. — 224 с.  
*Petrovskij A. D.* Radiovolnovye metody v podzemnoj geofizike [Radio wave methods in underground geophysics]. — Moscow: Nedra, 1971. — 224 p. (in Russian).
- Толстов А. В., Зинчук Н. Н., Серов И. В.* Основные результаты научно-исследовательских и опытно-методических работ НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) // Эффективность геологоразведочных работ на алмазы: прогнозно-ресурсные, методические, инновационно-технологические пути ее повышения: сборник. — 2018. — С. 12–30.  
*Tolstov A. V., Zinchuk N. N., Serov I. V.* Osnovnyye rezul'taty nauchno-issledovatel'skih i opytno-metodicheskikh rabot NIGP AK "ALROSA" (PAO) [Main results of research and experimental-methodical works of "ALROSA" (PJSC)] // Jefferktivnost' geologorazvedochnyh rabot na almazy: prognozno-resursnyye, metodicheskije, innovacionno-tehnologicheskije puti ee povyshenija: sbornik. — 2018. — P. 12–30 (in Russian).
- Черепанов А. О.* Многочастотные радиоволновые измерения в скважинах для контроля за процессом оттаивания ММП (на примере месторождения нефти «Русское», Западная Сибирь) // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2017. — № 4. — С. 118–123.  
*Cherepanov A. O.* Mnogochastotnye radiovolnovye izmereniya v skvazhinax dlya kontrolya za processom ottaivaniya MMP (na primere mestorozhdeniya nefi "Russkoe", Zapadnaya Sibir) [Multi-frequency radio wave measurements in wells to monitor the process of thawing MMP (example of the Russkoe oil field, Western Siberia)] // Vestnik KRAUNC. Ser. Nauki o Zemle. — 2017. — No. 4. — P. 118–123 (in Russian).
- Шмаков И. И.* Проблемы научного сопровождения при геологоразведочных работах на алмазы // Геология и минерагения Северной Евразии: материалы совещания, приуроченного к 60-летию Института геологии и геофизики СО АН СССР. — 3–5 октября 2017. Новосибирск, Россия. — С. 265.  
*Shmakov I. I.* Problemy nauchnogo soprovozhdeniya pri geologorazvedochnyx rabotax na almazy // Geologiya i minerageniya Severnoj Evrazii: materialy soveshhaniya, priurochennogo k 60-letiyu Instituta geologii i geofiziki SO AN SSSR [Geology and minerageny of northern Eurasia. Materials of the meeting dedicated to the 60-th anniversary of the Institute of Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR]. — 3–5 oktyabrya 2017 Novosibirsk, Rossiya. — P. 265 (in Russian).
- Aleshin I. M., Zhandalinov V. M.* Application of interpolation procedures for presentation of data electromagnetic wave lightning // Russian Journal of Earth Sciences. — 2009. — Vol. 11, No. 1. — P. 1–4.
- Altman N. S.* An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression // The American Statistician. — 1992. — Vol. 46, No. 3. — P. 175–185.
- Isaaks E. H., Srivastava R. M.* Applied Geostatistics. — New York: Oxford University Press, 1989. — 589 p.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.* The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. — Springer-Verlag, 2009. — 746 p.
- Mishra S., Shrivastava C., Ojha A., Miotti F.* Waterflood Surveillance by Calibrating Streamline-Based Simulation with Crosswell Electromagnetic Data // International Petroleum Technology Conference. — 26–28 March. — Beijing, China, 2019.
- Ordez F., Roggen D.* Deep convolutional and lstm recurrent neural networks for multimodal wearable activity recognition // Sensors. — 2016. — Vol. 16 (1): 115.