

Электрическое поле при откачке из водоносного горизонта в присутствии фильтрационной неоднородности*

А. А. Михайленко, П. К. Коносавский, К. В. Титов

Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Для цитирования: Михайленко, А. А., Коносавский, П. К., Титов, К. В. (2020). Электрическое поле при откачке из водоносного горизонта в присутствии фильтрационной неоднородности. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (4), 782–794.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.410>

Представлены результаты интерпретации потенциала естественного электрического поля (ЕП), вызванного откачкой воды из водоносного горизонта, включающего неоднородности по коэффициенту фильтрации. Последние представлены низко- и высокопроницаемыми отложениями в двух вариантах геометрии: полуограниченный пласт и пласт-полоса. Фильтрационная неоднородность рассмотрена на пяти моделях при двух вариантах значения коэффициента фильтрации. Вычисление потенциала проведено в трехмерной постановке в три последовательных этапа с применением программного кода Processing Modflow, предназначенного для решения задач фильтрации, и кода ElSources, специально разработанного для вычисления источников электрического поля. Найдены пространственные распределения понижения уровня подземных вод и потенциала естественного электрического поля, возникающего при создании гидродинамического возмущения. При проведении анализа полученных данных для более детального изучения влияния фильтрационной неоднородности были вычислены значения аномального поля. Полученные модельные распределения потенциала электрического поля отличны от тех, что получаются для случая однородного пласта. Выявлена корреляция между сигналами электрического поля и понижением уровня подземных вод для случая, когда неоднородность представлена слабопроницаемыми породами. Установлено, что для случая слабопроницаемых отложений по потенциалу ЕП отчетливо выделяются их границы. Для неоднородности, сложенной высокопроницаемыми отложениями, удалось выявить надежно только внутреннюю границу. Внешняя граница в данном случае не фиксируется в связи с высоким значением коэффициента фильтрации отложений, слагающих неоднородность, и малым градиентом напора на этой границе. Определено влияние горизонтальной мощности фильтрационной неоднородности на характер распределения потенциала естественного электрического поля. Полученные результаты могут послужить основой для оконтуривания неоднородностей в водоносном горизонте.

Ключевые слова: естественное электрическое поле, откачка, фильтрационная неоднородность, численное моделирование, коэффициент фильтрации.

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 17-17-01160 «Физико-химические модели вызванной и спонтанной поляризации применительно к опытно-фильтрационному опробованию водоносных горизонтов»).

1. Введение

Начиная с 2000-х годов отмечается повышенный интерес к изучению электрического поля фильтрационной природы с помощью численного моделирования (Revil et al., 2008; Titov et al., 2002; 2015; Konosavsky et al., 2017). Изучение электрического поля, возникающего в результате создания гидродинамического возмущения в водоносном пласте, является перспективным способом детализации структуры фильтрационного потока подземных вод. Применение метода естественного электрического поля (ЕП) позволяет изучать структуру потока подземных вод при наличии весьма ограниченного числа наблюдательных скважин. Проблема недостаточного числа наблюдательных скважин особенно сильно проявляется при опробовании водоносных горизонтов, включающих фильтрационные неоднородности.

В работах, посвященных численному моделированию потенциалов ЕП фильтрационной природы, рассмотрены некоторые типовые ситуации: откачка воды из напорного водоносного горизонта (Титов и Коносовский, 2014), откачка воды из слоистого в разрезе водоносного горизонта (Titov et al., 2015), откачка воды из скважины, несовершенной по степени вскрытия водоносного пласта (Коносовский и Титов, 2018). Также проведена оценка влияния материала обсадки откачивающей скважины на уровень сигнала ЕП (Konosavsky et al., 2017). В то же время до сих пор не рассмотрены особенности ЕП, возникающего при откачке из неоднородного в плане водоносного горизонта.

Цель настоящей работы состоит в численной оценке возможности ЕП для обнаружения фильтрационной неоднородности за счет измерения потенциала по частой сети наблюдений.

2. Методика и техника моделирования

Решение поставленной задачи с помощью численного моделирования проводится в три последовательных этапа. На первом этапе определяется пространственное распределение напоров подземных вод с помощью программного кода MODFLOW (в рамках пакета Processing Modflow v.5.3).

При этом решается уравнение

$$\nabla \cdot (k\nabla h) = \mu \frac{\partial h}{\partial t} + q, \quad (1)$$

где k — коэффициент фильтрации, h — гидродинамический напор, μ — коэффициент упругоёмкости, q — сторонние источники, которые характеризуют объем свободной воды, входящий или выходящий из пористой среды (Титов и Коносовский, 2014).

На втором этапе решается задача вычисления источников электрического поля фильтрационной природы с помощью специально разработанного программного кода ElSources (П. К. Коносовский). Источники вычисляются по уравнению (Des-Roches and Butler, 2017):

$$J = -\nabla \cdot (L\nabla h), \quad (2)$$

где J — плотность источников электрического поля, L — коэффициент Онзагера, характеризующий интенсивность потенциала течения (Sill, 1983).

На последнем этапе на основе электродинамической аналогии (Дружинин, 1956) вновь с помощью программного кода MODFLOW, но в стационарной постановке реализуется задача вычисления электрического поля путем решения соответствующего уравнения Пуассона (при условии однородности среды по электропроводности):

$$\nabla^2 U = J = \frac{L}{\sigma} \left(\nabla(\ln(k)) \nabla h - \frac{q}{k} \right), \quad (3)$$

где U — потенциал ЕП, σ — электропроводность горных пород.

Два слагаемых в правой части уравнения (3) определяют источники электрического поля: первое слагаемое связано с неоднородностями по коэффициенту фильтрации, второе — собственно с откачивающей скважиной. Результатом решения является пространственное распределение потенциалов ЕП.

3. Модели

Опробуемый водоносный горизонт является напорным, неограниченным в плане и изолированным водоупорными отложениями в разрезе (рис. 1). Горизонт мощностью 10 м сложен проницаемыми отложениями с коэффициентом фильтрации (k_f) равным 1 м/сут. Длительность опытного опробования составляет 2.82 суток. Откачка проводится из скважины, совершенной по степени вскрытия, с расходом 240 м³/сут. Размер области моделирования задавался таким образом, чтобы гидродинамическое возмущение от откачивающей скважины не достигло границ модели за время откачки. При разбивке модельной области на расчетные блоки использовался следующий подход: скважина вписана в небольшой блок, а с удалением от нее размеры блоков в плане увеличиваются. Уменьшение размеров блоков вновь происходит на границах неоднородности. Коэффициент Онзагера был принят равным $4 \cdot 10^{-5}$ А/м², согласно зависимости (Titov et al., 2015):

$$L = 3.24 \cdot 10^{-4} k^{0.18}. \quad (4)$$

Электропроводность отложений была принята равной 0.025 См/м, что характерно для песчаных отложений. Электрические параметры приняты равными для всех слоев модели, поскольку в рамках данной работы проводится изучение чувствительности сигналов ЕП только к наличию фильтрационной неоднородности.

Фильтрационная неоднородность в водоносном пласте представлена в виде пяти моделей, каждая из которых рассмотрена при двух вариантах значения коэффициента фильтрации.

В первой модели рассмотрена фильтрационная неоднородность в виде плановой линейной границы (рис. 2). Граница расположена на расстоянии 40 м от откачивающей скважины. Граница со слабопроницаемыми отложениями моделирует выклинивание основного водоносного горизонта. Граница с высокопроницаемыми отложениями отвечает области с постоянным напором.

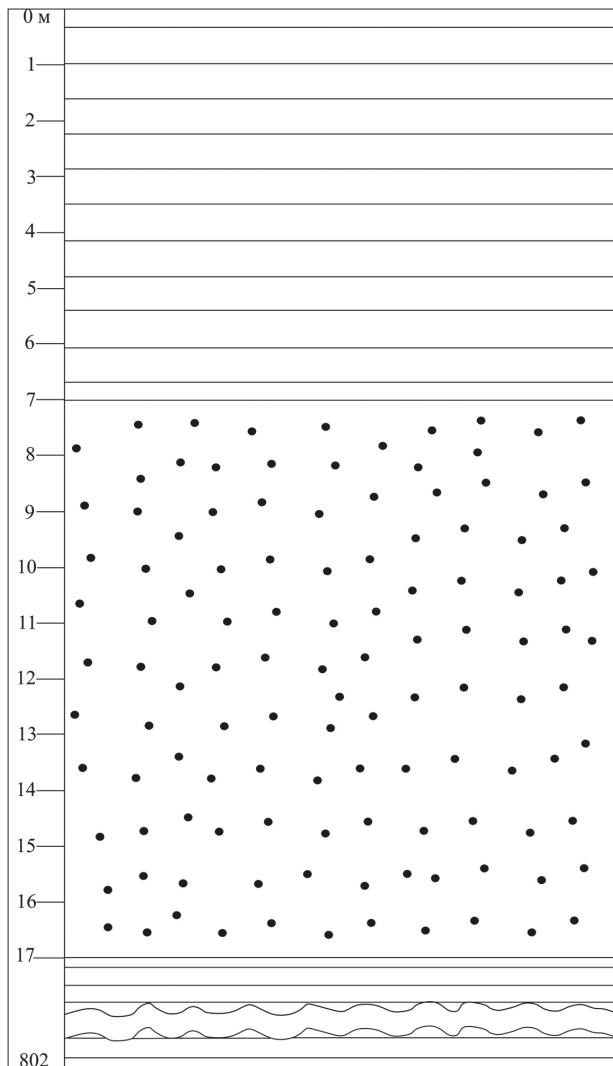


Рис. 1. Разрез модели



Рис. 2. Схема к задаче опробования из водоносного пласта с фильтрационной неоднородностью в виде плановой линейной границы

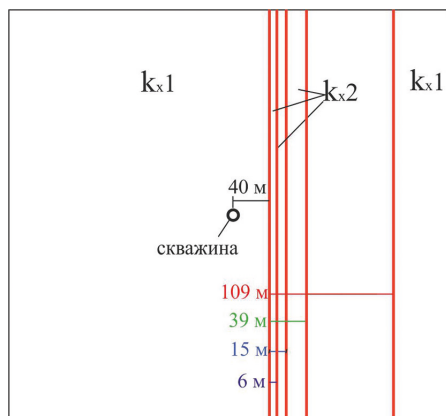


Рис. 3. Схема к задаче опробования из водоносного пласта с фильтрационной неоднородностью в виде пласта-полосы

В остальных моделях фильтрационная неоднородность представлена в виде пласта-полосы (рис. 3). Горизонтальная мощность пласта составляла 6, 15, 39 и 109 м. Таким образом, изучалось влияние чувствительности потенциала ЕП к расположению второй (дальней) границы пласта-полосы. Ближняя граница фильтрационной неоднородности расположена в 40 м от откачивающей скважины. Проницаемый пласт моделирует зону дробления пород, либо палеодолину, выполненную гравийным материалом. Слабопроницаемый пласт отвечает линзовидному (в разрезе) телу глин или суглинков, сформированному за счет фациальной изменчивости грунтов, либо интрузивному массиву.

Значения коэффициента фильтрации неоднородности заданы для слабопроницаемых отложений — 0.02 м/сут., для высокопроницаемых — 50 м/сут. Неоднородность распространена на всю мощность водоносного пласта.

4. Результаты и их обсуждение

В результате численного моделирования были получены данные по пространственному распределению значений понижения уровня подземных вод и электрического потенциала.

Результаты представлены на момент времени, отвечающий окончанию опытного опробования, т.е. на 2.82 суток. В данной работе рассматривается вариант кратковременной откачки. Длительность опытного опробования была выбрана исходя из наиболее реализуемого на практике варианта продолжительности кратковременной откачки. В дальнейших исследованиях планируется проведение серии численных экспериментов другой продолжительности опробования.

Так как цель настоящей работы состоит в изучении неоднородностей, для анализа данных были вычислены значения аномального поля. Под аномальным полем понимается разность вычисленных значений (потенциала и понижения) и значений для однородного водоносного горизонта. В соответствии с уравнением (3) при этом исключается влияние источника, расположенного на скважине,

и тем самым подчеркивается влияние неоднородностей на распределения напоров и потенциала ЕП.

Ниже представлены результаты, полученные для включения в виде пласта-полосы, в сравнении с результатами для случая фильтрационной неоднородности в виде плановой линейной границы. При анализе полученных результатов было выявлено, что на разностное поле не влияет материал обсадки откачивающей скважины, что характерно для исходных полей. Последнее связано с тем, что постоянное второе слагаемое уравнения (3) присутствует как в поле для однородного горизонта, так и в поле для неоднородного горизонта и при вычитании исчезает.

4.1. Включение слабопроницаемых отложений

Зависимости понижения уровня подземных вод (рис. 4) в водоносном пласте и потенциала ЕП (рис. 5), обусловленного откачкой, показаны в условиях увеличения расстояния от откачивающей скважины до дальней границы пласта-полосы. Наблюдается хорошо выраженная гидродинамическая реакция и реакция электрического поля на наличие неоднородности.

Ближней границе неоднородности отвечает максимум кривой понижения (значения от 4.4 до 6.7 м) и кривой потенциала ЕП (значения от 1.8 до 2.5 мВ). Разница в значениях в экстремуме связана с разными значениями понижения, которые, в свою очередь, связаны с различной мощностью пласта-полосы.

На графике понижения внешняя граница пласта-полосы отвечает минимуму (от -4 до -5 м), как и для потенциала ЕП (от -1.8 до -2.2 мВ). С увеличением ширины пласта-полосы отмечается выполаживание минимумов. Начиная со значения мощности пласта-полосы в 109 м, кривые понижения и потенциала ведут себя как в случае неограниченного пласта: расстояние до возмущающей скважины оказывается слишком большим, чтобы выделить внешнюю границу.

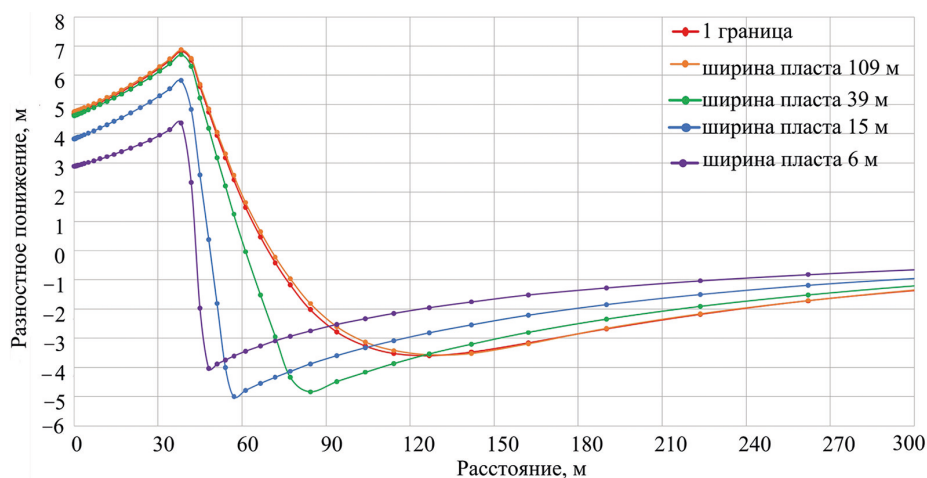


Рис. 4. Зависимость понижения в водоносном горизонте от расстояния до откачивающей скважины для неоднородности, сложенной слабопроницаемыми отложениями

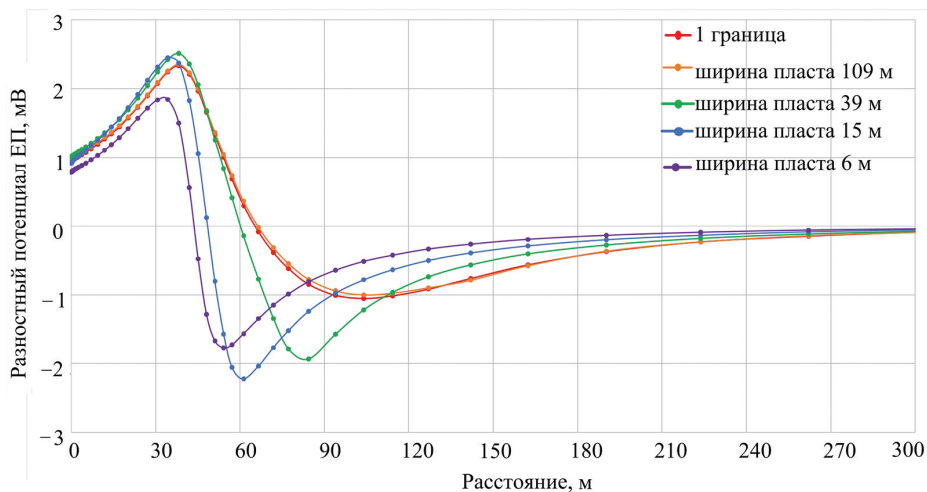


Рис. 5. Зависимость потенциала ЕП от расстояния до откачивающей скважины для неоднородности, сложенной слабопроницаемыми отложениями

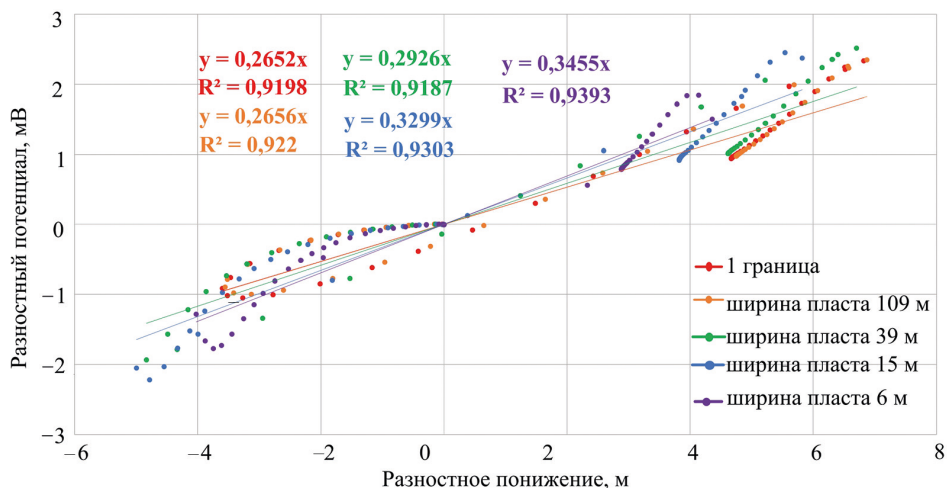


Рис. 6. Зависимость между понижением уровня подземных вод и потенциалов ЕП для неоднородности, сложенной слабопроницаемыми отложениями

На рис. 6 показана зависимость между потенциалом ЕП и понижением для каждой из моделей. При этом для каждой модели установлена линейная зависимость аномалий ЕП и понижения с коэффициентом определенности больше 0.9. Кроме того, вся совокупность данных находится в линейной связи с коэффициентом определенности 0.8. Таким образом, анализ данных ЕП по профилю позволяет надежно определить положение границы фильтрационной неоднородности и предсказать значения понижения.

Анализ распределения в плане понижения (рис. 7) и потенциала ЕП (рис. 8) приводит к неожиданному результату. Внутренняя граница маркируется по данным ЕП даже надежнее, чем по понижению, за счет вытянутого характера максимума аномального потенциала. Дальняя граница отмечается вытянутым минимумом,

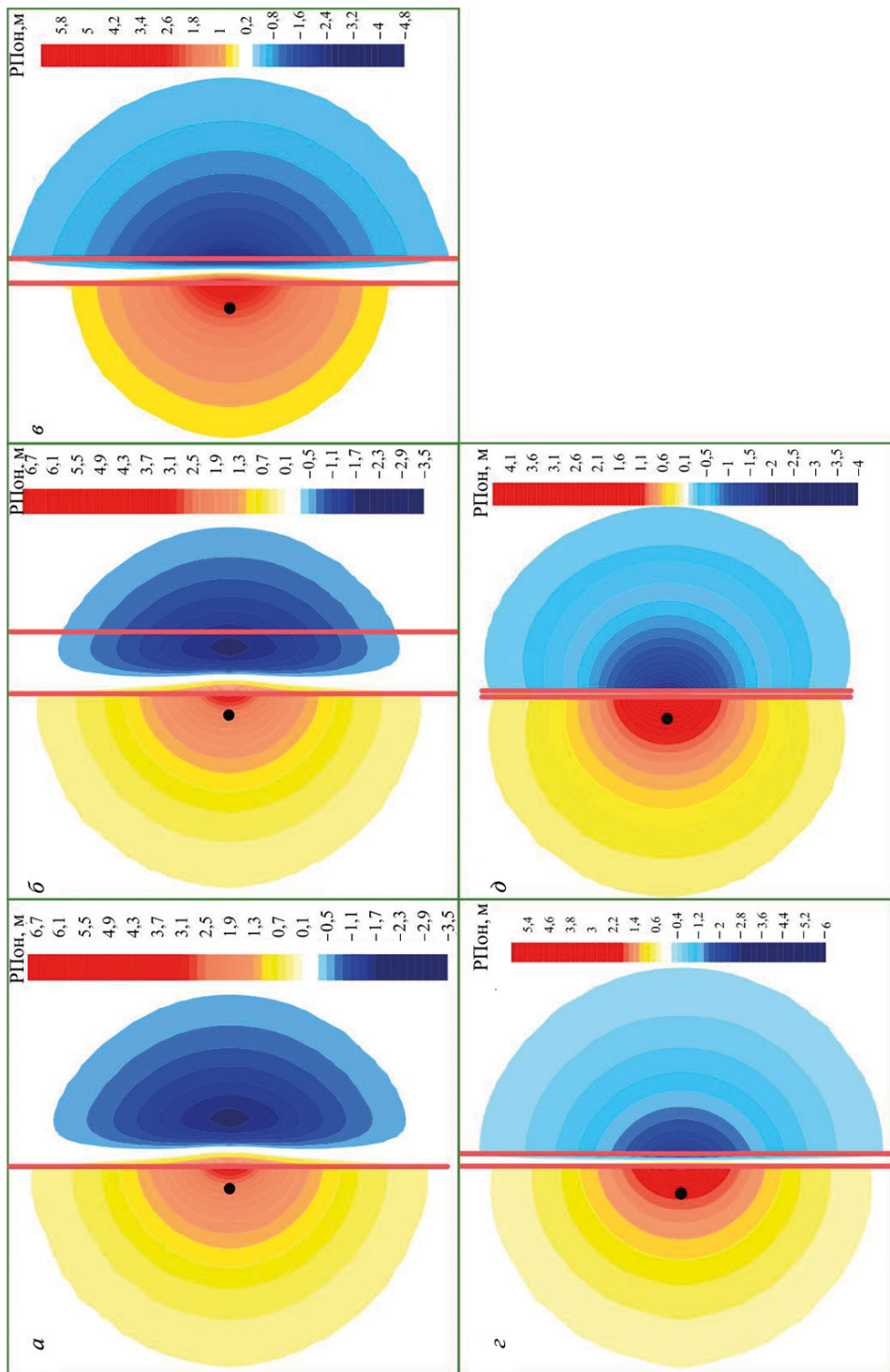


Рис. 7. Плановое распределение различного разности понижения уровня подземных вод: неоднородность в виде плановой линейной границы (*а*); ширина пласта-полосы: 109 м (*б*), 39 м (*в*), 15 м (*г*), 15 м (*д*), 6 м (*ж*)

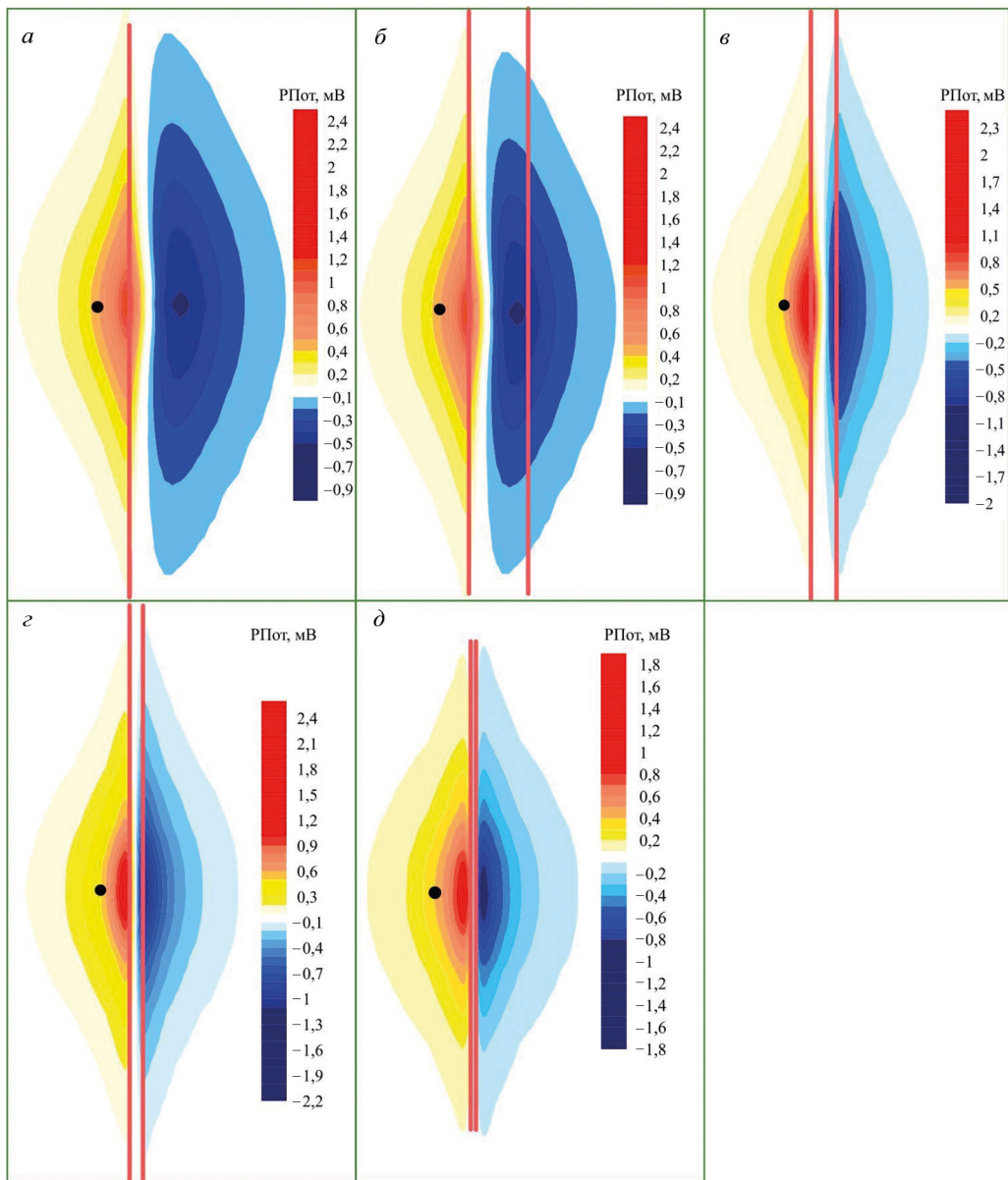


Рис. 8. Плановое распределение разностного потенциала ЕП: неоднородность в виде плановой линейной границы (а); ширина пласта-полосы: 109 м (б), 39 м (в), 15 м (г), 6 м (д)

который, как и при рассмотрении профиля, маркирует границу при ее относительно небольшом удалении от скважины. При этом наблюдается однотипное плановое распределение и понижения, и потенциала ЕП для мощного (109 м) и безграничного пласта.

4.2. Включение высокопроницаемых отложений

Зависимости понижения уровня подземных вод (рис. 9) в водоносном пласте и потенциала ЕП (рис. 10) от расстояния до откачивающей скважины показывают выраженную гидродинамическую реакцию и реакцию электрического поля на внутреннюю границу неоднородности. Вторая граница пласта-полосы не фиксируется.

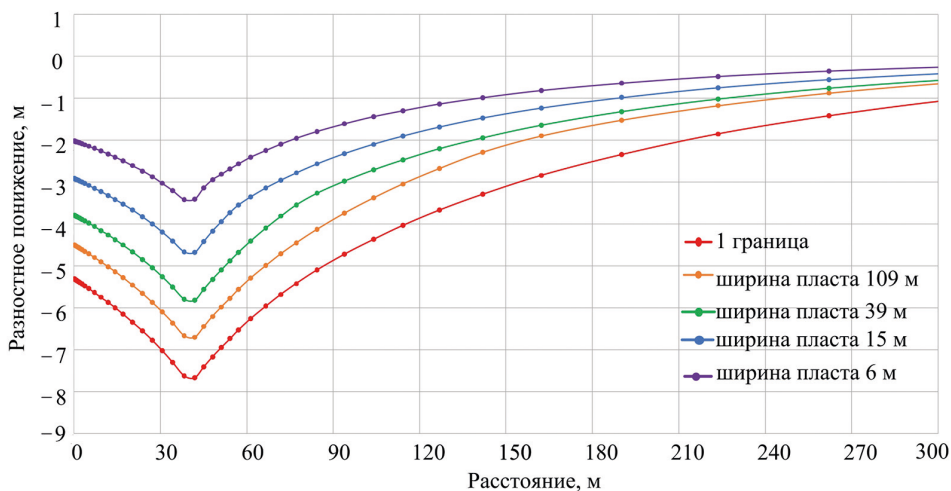


Рис. 9. Зависимость понижения в водоносном горизонте от расстояния до откачивающей скважины для неоднородности, сложенной высокопроницаемыми отложениями

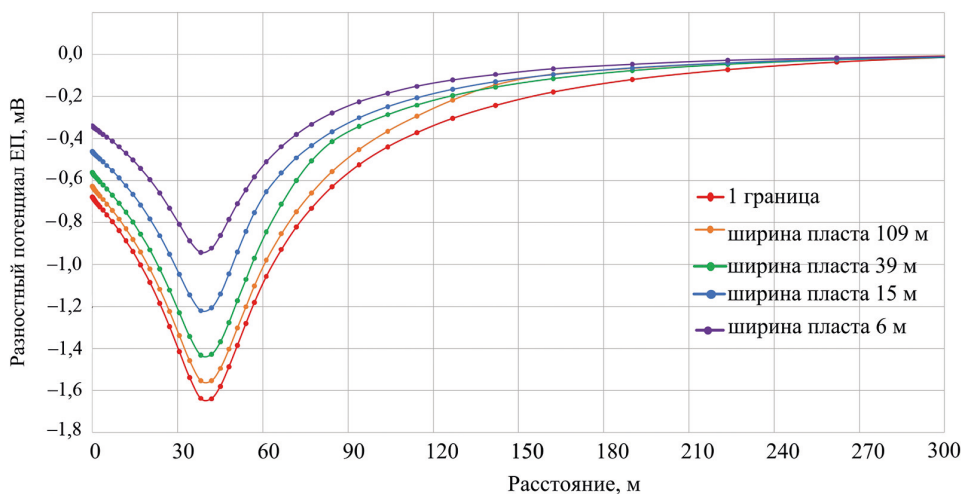


Рис. 10. Зависимость потенциала ЕП от расстояния до откачивающей скважины для неоднородности, сложенной высокопроницаемыми отложениями

ется, что обусловлено высоким значением коэффициента фильтрации отложений, слагающих неоднородность, и малым градиентом напора на этой границе (уравнение (3)). Несмотря на сходство графиков понижения и аномального потенциала, корреляционная связь между ними невысока. Плановые распределения не дают дополнительной информации о положении границы по сравнению с данными по профилю, в отличие от случая слабопроницаемой неоднородности.

В продолжение исследования мы планируем провести серию полевых экспериментов по опытному опробованию водоносного горизонта в присутствии фильтрационной неоднородности, для того чтобы провести сопоставление результатов полевых опытов и численных экспериментов.

5. Выводы

Мы выполнили численное моделирование сигналов ЕП, порожденных откачкой воды из водоносного горизонта с фильтрационными неоднородностями. Результаты моделирования показывают корреляцию сигналов электрического поля и понижения уровня подземных вод в том случае, если неоднородность представлена слабопроницаемыми породами. Данная корреляция позволяет проводить оценку понижения на основе калибровки сигналов ЕП по данным о понижениях по нескольким наблюдательным скважинам. Установлено, что для случая слабопроницаемых отложений по потенциалу ЕП отчетливо выделяются их границы. В случае неоднородности с высокой проницаемостью ее внутренняя граница выделяется надежно, а внешняя не отмечается ни по понижениям, ни по электрическому полю. Представленные результаты могут послужить основой для томографии неоднородностей в водоносных горизонтах на основе данных ЕП.

Литература

- Дружинин, Н. И. (1956). *Метод электрогидродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации*. Госэнергоиздат.
- Коносавский, П. К., Титов, К. В. (2018). Интерпретация данных естественного электрического поля с учетом несовершенства водозаборных скважин (модельные представления). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 63 (4), 533–543. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.408>
- Титов, К. В., Коносавский, П. К. (2014). Применение естественного электрического поля при откачках из скважин (обзор). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, (4), 52–62.
- DesRoches, A. J. and Butler, K. E. (2017). Monitoring and modelling of pumping-induced self-potentials for transmissivity estimation within a heterogeneous confined aquifer. *Geophysical Journal International*, 207, 1722–1738.
- Konosavsky, P., Maineult, A., Narbut, M. and Titov, K. (2017). Self-potential response to periodic pumping test: a numerical study. *Geophysical Journal International*, 210, 1901–1908.
- Revil, A., Gevaudan, C., Lu, N. and Maineult, A. (2008). Hysteresis of the self-potential response associated with harmonic pumping tests. *Geophysical Research Letters*, 35 (16), L16402.
- Sill, W. R. (1983). Self-potential modeling from primary flows. *Geophysics*, 48 (1), 76.
- Titov, K., Konosavsky, P., Ilyin, Y. and Levitski, A. (2002). An electrokinetic spontaneous polarization in porous media: petrophysics and numerical modeling. *Journal of Hydrology*, 267, 3–4.
- Titov, K., Konosavsky, P. and Narbut, M. (2015). Pumping test in a layered aquifer: numerical analysis of self-potential signals. *Journal of Applied Geophysics*, 123, 188–193.

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2019 г.
Статья рекомендована в печать 12 октября 2020 г.

Контактная информация:

Михайленко Александра Александровна — alexsandra-mihailenko@mail.ru

Коносавский Павел Константинович — konosavsky@dhspsb.ru

Титов Константин Владиславович — k.titov@spbu.ru

Self-potential signals produced by pumping test of heterogeneous aquifer*

A. A. Mikhailenko, P. K. Konosavsky, K. V. Titov

St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Mikhailenko, A. A., Konosavsky, P. K., Titov, K. V. (2020). Self-potential signals produced by pumping test of heterogeneous aquifer. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (4), 782–794. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.410> (In Russian)

In this paper, we present results of interpretation of self-potential (SP) signals produced by a pumping test experiment of a heterogeneous aquifer. Heterogeneity is represented by a zone with low and high hydraulic conductivity in two types of configuration: planned boundary and strip-layer. We studied five models for each type of heterogeneity with two variants of hydraulic conductivity. We carried out three-dimensional modelling with the use of Modflow (for hydraulic heads and electrical potentials) and ElSources (for current source term). The SP distributions obtained from the pumping test indicate heterogeneity. We calculated the values of the anomalous field for a detailed study of the heterogeneities. We found a correlation between SP and drawdown for the case of heterogeneity with low hydraulic conductivity. We defined both boundaries of the strip clearly for the zone with low hydraulic conductivity. The outer boundary of the strip-layer was not fixed due to the high hydraulic conductivity of the heterogeneity and low hydraulic gradient at the boundary. We estimated dependence of horizontal thickness of heterogeneity on SP distribution. The results can serve as a base for defining the heterogeneities in the aquifer.

Keywords: self-potential, pumping test, heterogeneity, numerical modelling, hydraulic conductivity.

References

- Druzhinin, N. I. (1956). *Method of electrohydrodynamic analogies and its application in the study of filtration*. Gosenergoizdat Publ. (In Russian)
- Konosavsky, P. K. and Titov, K. V. (2018) Interpretation of Self-Potential pumping well. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 63 (4), 533–543. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.408> (In Russian)
- Titov, K., Konosavsky, P., Ilyin, Y. and Levitski, A. (2002). An electrokinetic spontaneous polarization in porous media: petrophysics and numerical modeling. *Journal of Hydrology*, 267, 3–4.
- Titov, K. V. and Konosavsky, P. K. (2014). Application of the self-potential to pumping tests (review). *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, (4), 52–62. (In Russian)
- DesRoches, A. J. and Butler, K. E. (2017). Monitoring and modelling of pumping-induced self-potentials for transmissivity estimation within a heterogeneous confined aquifer. *Geophysical Journal International*, 207, 1722–1738.

* This work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 17-17-01160 “Physico-chemical models of evoked and spontaneous polarization as applied to the experimental filtration sampling of aquifers”).

- Konosavsky, P., Maineult, A., Narbut, M. and Titov, K. (2017). Self-potential response to periodic pumping test: a numerical study. *Geophysical Journal International*, 210, 1901–1908.
- Revil, A., Gevaudan, C., Lu, N. and Maineult, A. (2008). Hysteresis of the self-potential response associated with harmonic pumping tests. *Geophysical Research Letters*, 35 (16), L16402.
- Sill, W.R. (1983). Self-potential modeling from primary flows. *Geophysics*, 48 (1), 76.
- Titov, K., Konosavsky, P. and Narbut, M. (2015). Pumping test in a layered aquifer: numerical analysis of self-potential signals. *Journal of Applied Geophysics*, 123, 188–193.

Received: December 6, 2019

Accepted: October 12, 2020

Contact information:

Aleksandra A. Mikhailenko — aleksandra-mihailenko@mail.ru

Pavel K. Konosavsky — konosavsky@dhspsb.ru

Konstantin V. Titov — k.titov@spbu.ru