

Обоснование геоэлектрической модели пресноводного коллектора на акваториях

Е. В. Агеенков^{1}, С. А. Иванов², В. В. Оленченко¹*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² ООО Сибирская геофизическая научно-производственная компания, г. Иркутск, Российская Федерация
* e-mail: AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Существующая проблема нехватки пресной воды актуальна для огромной территории нашей планеты. Часто засушливые регионы омываются солёными водоёмами, под акваториями которых развиты значительные объёмы субаквальной пресной воды. Для поиска этих вод рационально применять аквальные методы электроразведки. Приводится обоснование геоэлектрической модели пресноводного коллектора на акваториях для проведения численного моделирования электроразведочного сигнала на постоянном токе и во время переходного процесса. Результат исследования показывает рациональность использования электроразведочных методов для поиска и разведки пресноводных коллекторов на акваториях.

Ключевые слова: геоэлектрическая модель, коллектор пресной воды, электроразведка на акватории

Substantiation of the geoelectric model of the freshwater reservoir in the water areas

E. V. Ageenkov^{1}, S. A. Ivanov², V. V. Olenchenko¹*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² "Siberian Geophysical Research Production Company", LLC, Irkutsk, Russian Federation
* e-mail: AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru

Abstract. The relevance of the search for fresh water exists for large areas of the planet. Often arid regions are washed by saline reservoirs, under the waters of which lie significant volumes of fresh water. To search for these waters, it is rational to use aquatic methods of electrical exploration. The substantiation of the geoelectrical model of a freshwater reservoir in offshore areas for numerical modeling of an electrical survey signal at direct current and during a transient process is given. The result of the study shows the rationality of using electrical exploration methods for the search and exploration of freshwater reservoirs in the water areas.

Keywords: geoelectric model, reservoir of fresh water, electrical prospecting in the water area

Введение

Общий объем воды на Земле составляет примерно 1400 млн км³, из которых лишь 2,5%, то есть около 35 млн км³, приходится на пресную воду. Большая часть запасов пресной воды сосредоточена в многолетних льдах и снегах Антарктиды и Гренландии, а также в глубоких водоносных горизонтах [1].

В водном цикле из общего количества выпадающих на Землю осадков 79 % приходится на океан, 2 % – на озера и только 19 % – на поверхность суши. Объём 2,2 тыс. км³ воды проникает за год в подземные резервуары.

Под дном морей, крупных озер и рек развиты субаквальные подземные воды, гидравлически связанные с водами этих водоемов. Разгрузка субмаринных источников происходит ниже уровня моря в шельфовой зоне. Они проявляются характерным вскипанием воды на поверхности моря. Роль их бывает настолько велика, что они могут уменьшать солёность морской воды [2].

Подземный сток в моря – важный показатель ресурсов подземных вод. В приморских районах недостаток в пресной воде хорошего качества в ряде случаев можно значительно уменьшить или даже покрыть полностью за счет использования субаквальных вод. В некоторых странах уже имеется положительный опыт использования вод крупных субмаринных (подводных) источников, разгружающихся в море недалеко от берега, а также опыт эксплуатации скважин, пробуренных на шельфе и вскрывших пресные подземные воды для водоснабжения приморских населенных пунктов [3]. В специальной литературе описываются многочисленные случаи практического использования вод субмаринных источников, а также отдельных скважин, пробуренных в морях, для целей водоснабжения [4]. Большое развитие субмаринные источники получили на подводных склонах островных систем с ярко выраженным горным рельефом (Гавайские, Филиппинские, Большие Антильские острова, Большой Зондский и Малый Зондский архипелаги). Один из наиболее крупных в мире субмаринных источников известен у берегов о-ва Ямайки, где в 1,5 км от берега с глубины 256 м пробивается к поверхности факел пресной воды с дебитом на выходе 43 м³/с. Наиболее богато подводными выходами подземных вод Средиземное море, где субмаринные источники приурочены к трещинам и карстовым каналам в горных породах. В Эгейском море вблизи юго-восточного побережья Греции обнаружен субмаринный источник пресной воды с большим расходом. Многие субмаринные источники приурочены к подземным каньонам, которые нередко представляют собой подводное продолжение устья рек. Так, например, от устья р. Ганга в Бенгальский залив протянулся подводный каньон длиной более 1600 км, шириной около 700 км и глубиной более 70 м, к которому приурочены выходы субмаринных подземных вод. В Персидском заливе в районе островов Бахрейн выходит большое количество субмаринных родников с минерализацией воды около 4 г/л, область питания которых находится на расстоянии более 100 км на территории Саудовской Аравии [5].

Нехватка пресной воды на ряде территорий позволяет говорить о необходимости поиска пресноводных коллекторов под морскими акваториями. Одна из таких территорий – полуостров Крым, который омывают воды Азовского и Чёрного морей. Средняя глубина Азовского моря 7 м, максимальная – 13 м [6]. Отмелые берега моря переходят в ровное плоское дно. Глубины плавно увеличиваются с удалением от берегов. Самые большие глубины находятся в центральной части моря, глубины в Таганрогском заливе – от 2 до 9 м. Средняя глубина Чёрного моря 1240 м, максимальная – 2210 м. В рельефе черноморского дна выде-

ляют: шельф, протяженный материковый склон, глубокую котловину. Самая широкая часть шельфа (около 200 км) находится на северо-западе Черного моря. Толщина водного слоя здесь 110–160 м. Глубина воды над шельфом в других местах моря меньше и не превышает 110 м. Ширина – от 10 до 15 км.

Для Азовского моря характерен подрусловый сток пресных вод, приуроченный к погребенным руслам палео-Дона, палео-Кубани и других более мелких рек Северного Приазовья [7]. Как показывают палеогеографические и палеофациальные реконструкции условий осадконакопления [8], в разные моменты четвертичной истории палео-Дон протекал по разным руслам, но непременно выходил в Черное море, создав хорошо выработанную авандельту Керченского пролива. Скважиной 17, пробуренной НИС “Геохимик” в 50 км к северу от Керченского полуострова, и попавшей в одно из палеорусел Дона, вскрыты аллювиальные пески с пресной водой, что может служить доказательством значительного распространения пресных вод под чехлом донных отложений Азовского моря [7].

Методы и материалы

Анализ опубликованных в открытой печати работ позволяет разработать и обосновать геоэлектрическую модель пресноводного коллектора на акваториях морей на примере Азовского моря.

Большая часть площади прилегающих районов суши Азовского моря находится на территории Азово-Кубанской гидрогеологической области – Азово-Кубанский бассейн пластовых напорных вод, представленной Западно-Кубанским и Центрально-Кубанским гидрогеологическими районами. Западнее расположен Западно-Кавказский гидрогеологический район (Большекавказская гидрогеологическая область) [9].

Согласно [10] на территории Азово-Кубанского артезианского бассейна обнаружено не менее четырех горизонтов в отложениях плиоцен-четвертичного возраста, расположенные в континентальной части Краснодарского края на глубинах до 100–500 м, которые содержат пресную воду с минерализацией 0,4–1,8 г/л.

Горные породы, слагающие морские разрезы, обладают существенно меньшим УЭС, чем аналогичные породы в условиях суши. Это связано с наличием морской воды, которая заполняет поровое пространство верхних частей разреза, а также проникает по трещинам и ослабленным зонам. УЭС морской воды составляет 0,2–1 Ом·м. По сведениям, приведенным в [11], на основании имеющихся данных бурения в Каспийском море (вал Карпинского), можно сделать следующие оценки УЭС пород в этом регионе: карбонатные толщи – 5–20 Ом·м, терригенно-осадочные толщи – 1–10 Ом·м, глинистые толщи – 0,3–3 Ом·м, сопротивление морской воды – 0,6–0,8 Ом·м. В соответствии с графиком экспериментальной палетки зависимости удельного сопротивления водонасыщенных пород от общей минерализации (М) воды сопротивление песчаников, насыщенных пресной водой с М=1 г/л, составляет 20 Ом·м и выше [12].

По результатам морской съёмки, проведенной в 2017 г. с привлечением сотрудников постов мониторинга и Керченского филиала ФГБНУ «АЗНИИРХ», солёность Азовского моря составила 13,8 ‰ [13].

Результаты

В результате работы предложена упрощённая геоэлектрическая модель пресноводного коллектора под морской акваторией (на примере условий, близких к условиям Азовского моря), графики сигнала на постоянном токе и во время переходного процесса, рассчитанные для нормальной и аномальной модели.

При минерализации воды 13,8 г/л (13,8 ‰) оценочное значение УЭС воды составляет 0,72 Ом·м (по оценочной формуле $\rho = 10/M$). Мощность водного слоя в модели задана 10 м (по данным батиметрии средняя глубина составляет 12 м).

Под водным слоем илистые и глинистые отложения с УЭС 2 Ом·м. Мощностью 25, 50, 100, 250 и 500 м.

Под ними водоносный горизонт песчаников. При заполнении песчаников слабосоленоватыми водами с минерализацией 20 г/л УЭС слоя составит 2 Ом·м [12]. При заполнении песчаников пресными водами с минерализацией 1 г/л и менее УЭС слоя задано в 20 Ом·м [12]. Мощность водоносного горизонта задана 20 м.

Под горизонтом песчаников проводящие отложения с УЭС 2 Ом·м.

Горным породам присуще свойство поляризации, обусловленное рядом электрокинетических процессов, протекающих в геологической среде во время воздействия ЭМ источником. Для ионопроводящих сред характерны невысокие значения коэффициента поляризуемости и времена релаксации порядка 20–200 мс [14]. Для горизонтов, обводнённых пресной водой, характерна поляризуемость на уровне 3–6%, для обводнённых минерализованной водой – 0,5–1% (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Нормальная геоэлектрическая модель

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C, б.р.	h, м
1	0,72	0			10
2	2	1	0,1	0,5	∞

Таблица 2

Аномальная геоэлектрическая модель

Слой	ρ , Ом·м	η , %	τ , с	C, б.р.	h, м
1	0,72	0			10
2	2	1	0,1	0,5	25 (50, 100, 250, 500)
3	20	5	0,1	0,5	20
4	2	1	0,1	0,5	∞

Используя прямую задачу электроразведки на постоянном токе, выполнены расчёты кажущегося сопротивления для описанных моделей на дипольной установке [15] (Рис. 1). Использовались установки с длиной источника 50, 250, 500

и 2000 м, длиной приёмников 25, 125, 250 и 1000 м и расстоянием между центрами источника и приёмника (разносом), кратным длине источника: $(3/2) \cdot AB$, $2 \cdot AB$, $(5/2) \cdot AB$, $3 \cdot AB$, $(7/2) \cdot AB$, $4 \cdot AB$, $(9/2) \cdot AB$, $5 \cdot AB$.

Между сигналом от нормальной и аномальной модели выполнены расчёты невязки (1):

$$\varepsilon_{\rho_k} = \frac{2(\rho_{kM1} - \rho_{kM2})}{(\rho_{kM1} + \rho_{kM2})} \cdot 100\% \quad (1)$$

где ρ_{kM1} – кажущееся сопротивление для нормальной модели, ρ_{kM2} – кажущееся сопротивление для аномальной модели.

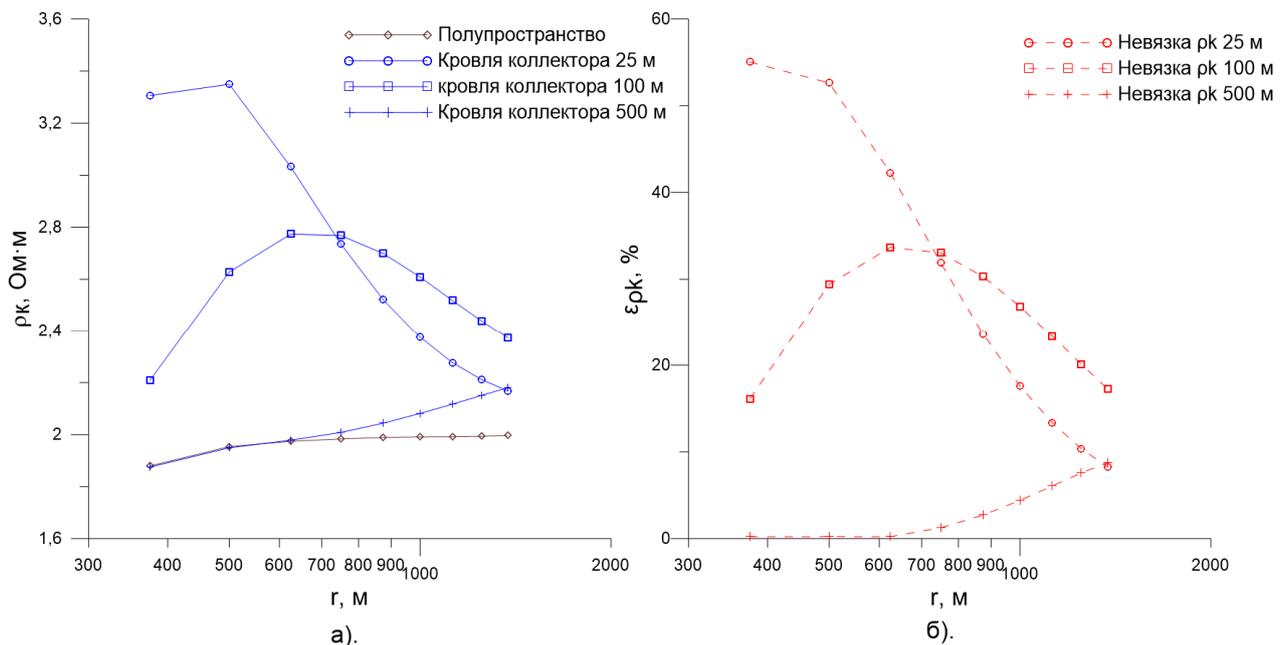


Рис. 1. Кривые кажущегося сопротивления (а) для моделей с кровлей пресноводного коллектора на глубине 25, 100 и 500 м для дипольной установки с длиной источника 250 м и невязка сигналов (б) нормальной и аномальной моделей.

На рис. 1 приведены графики распределения кажущегося сопротивления (см. рис. 1 а) в зависимости от разноса между центрами линии источника и линиями приёмников и невязка сигналов (см. рис. 1 б) для моделей с коллектором и без него.

Используя электромагнитную прямую задачу, выполнены расчёты переходного процесса и кажущейся поляризуемости (Рис. 2) на дипольной установке для нормальной и аномальной моделей. Кажущаяся поляризуемость – это отношение разности потенциалов на поздних временах переходного процесса и во время пропускания тока. Переходный процесс рассчитывался со 100 мкс до 15 с.

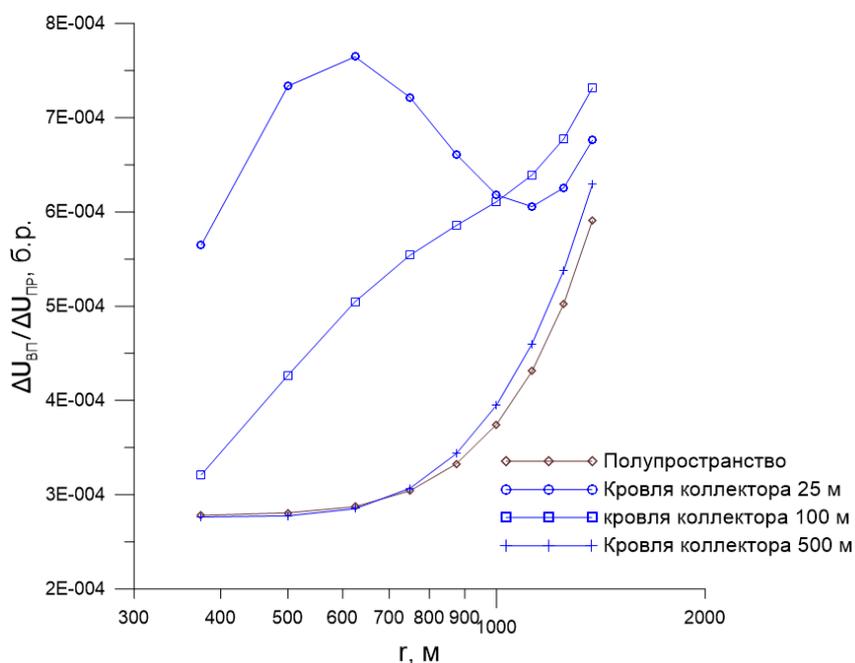


Рис. 2. Кривые кажущейся поляризуемости для моделей с кровлей пресноводного коллектора на глубине 25, 100 и 500 м для дипольной установки с длиной источника 250 м.

Обсуждение

Разработанная геоэлектрическая модель позволяет проводить численные расчёты электроразведочного сигнала, изучать применение различных установок для поиска и разведки субаквальных коллекторов пресной воды, искать оптимальные параметры электроразведочной съёмки.

Из графиков (см. рис. 1) видно, как проявляется пресноводный коллектор в кажущемся сопротивлении на дипольной установке при его погружении с 25 до 500 м.

При длине источника 250 м разносы установки составляют: 375, 500, 625, 750, 875, 1000, 1125, 1250 м. Проявление коллектора на графиках ρ_k показывает эффективную глубину зондирования на постоянном токе для такого типа установки в исследуемых геоэлектрических условиях. Её можно оценить, как $1/7 - 1/5$ длины разноса. Использование дипольной установки с большим числом измерительных линий (при исследовании использовалось 8 измерителей) позволяет определить присутствие коллектора в широком диапазоне глубин от 25 до 500 м.

Коллектор проявляется и в сигнале вызванной поляризации (см. рис. 2), но глубинность исследования сокращается.

Заключение

Полученные результаты позволяют говорить об обоснованности и рациональности использования электроразведочных методов для поиска и разведки коллекторов пресной воды на акваториях. Искомые объекты проявляются в таких

геоэлектрических свойствах, как УЭС и поляризационные характеристики, описывающие интенсивность и время релаксации поляризационных процессов.

В дальнейшем необходимо уточнить методики проведения электроразведочных работ на акваториях и найти оптимальные параметры съёмки.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований (ФНИ) №FWZZ-2022-0024.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дефицит пресной воды в странах мира. Справка. [Электронный ресурс] РИА Новости. – Режим доступа: <https://ria.ru/20100322/215718166.html>, свободный. – (дата обращения: 01.04.2022)
2. Kohout F.A. Submarine springs, a neglected phenomenon of coastal hydrology // Central Treaty Organization's Symposium on Hydrology and Water Resources Development. – Ankara, Turkey, 1966. – P.391–413.
3. Каримова О.А., Зекцер И.С. Вода под водой. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://wsyakaawasyachina.narod.ru/earth_sciences/submarine_water.html, свободный. – (дата обращения: 01.04.2022).
4. Максимович Г.А. Источники пресной воды на дне морей. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://nsi.psu.ru/cave/bibl/148_1956.pdf, свободный. – (дата обращения: 01.04.2022).
5. Коротков А.И., Павлов А.Н., Юровский Ю.Г. Гидрогеология шельфовых областей. Л.: Недра. – 1980. – 216 с.
6. Заклинский Г. В., Лимонов А. Ф. Азовское море // Большая российская энциклопедия. Электронная версия. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/1803902>; Дата обращения: 23.03.2022
7. Иноземцев Ю.И., Парышев А.А., Княжевский Г.Е., Маслаков Н.А., Рыбак Е.Н. Первопроходец в области морских научных геологических изысканий в акваториях Черного и Азовского морей — Е.Ф. Шнюков. // Геологія і корисні копалини Світового океану. – 2020. – 16, № 1. – С. 69—91.
8. Палеогеография Приазовья в голоцене / Г.Г. Матишов, В.В. Титов, Г.В. Ковалёва и др.; отв. ред. акад. Г.Г. Матишов. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2019. – 224 с.
9. Корсаков С.Г., Зарубин В.В., Соколов В.В., Черных В.И., Прокуронов П.В., Сааков В.Г., Ослопов Д.С., Романова Г.Е., Селешук Л.М., Гросс Е.Г., Сивуха Н.М., Глебов А.Ю., Зверья А.Ф. Государственная геологическая карта Российской Федерации / ред. К.О. Ростовцев. – Масштаб 1: 200 000. Издание второе. Серия Кавказская. Лист L-37-XIX, XXV (Тамань). Объяснительная записка. – М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 107 с.
10. Погорельский Н.С., Гавриленко И.И. Гидрогеологическая карта дочетвертичных и нижнечетвертичных отложений Северного Кавказа [Электронный ресурс] / ред. С.А. Шагоянц. – 1:1500000. – Режим доступа: https://hge.spbu.ru/mapgis/subekt/krasnodar/gd_map.pdf, свободный. – (дата обращения: 01.04.2022)
11. Маловичко М.С. Электромагнитные геометрические зондирования с донными косами при поисках углеводородов на мелководье: дис. канд. техн. наук. - Санкт-Петербург, 2014 – 151 с.
12. Рыжов А.А., Шевнин В.А., Квон Д.А. Петрофизический подход к данным малоуглубинной электроразведки // Конференция «Инженерная, угольная и рудная геофизика-2015. Современное состояние и перспективы развития». – Сочи. – 2015. – С. 26-30.

13. Шишкин В.М., Лутынская М.А., Фоменко И.Ф., Подмарева Т.И., Карманов В.Г., Бурлачко Д.С., Безрукавая Е.А., Жукова С.В. Гидрологический режим Азовского моря в 2017 г. [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <http://azniirkh.vniro.ru/wp-content/uploads/2018/02/Prezent.-Az.m.-2017.pdf>, свободный. – (дата обращения: 01.04.2022)

14. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Л.: Недра. – 1980. – 391 с.

15. Ситников А.А., Агеенков Е.В., Иванов С.А., Жуган П.П., Мальцев С.Х. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопоисковых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2017. – №2. – С. 42–49.

© Е. В. Агеенков, С. А. Иванов, В. В. Оленченко, 2022