

## Электроразведка для изучения пресноводного коллектора на акваториях

*Е. В. Агеенков\*, В. В. Оленченко, А. С. Калганов*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Субаквальные пресноводные коллекторы развиты под акваториями морей, крупных рек и озёр. В регионах, где ощущается нехватка пресной воды становятся актуальными её поиски и добыча из таких коллекторов. Рассмотрены дипольные электрические установки для решения задачи поиска и разведки пресноводного коллектора на акваториях. Для нормальной и аномальной модели изучены изменения удельного электрического сопротивления и поляризуемости. Сделаны выводы об оптимальности параметров электромагнитной съёмки для решения гидрогеологических задач на акваториях.

**Ключевые слова:** субаквальные воды, электроразведка, электрические линии

## Electrical prospecting for the study of freshwater reservoirs in water areas

*E. V. Ageenkov\*, V. V. Olenchenko, A. S. Kalganov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\* e-mail: AgeenkovEV@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** Subaqueous freshwater collectors are developed under the waters of the seas, large rivers and lakes. In regions where there is a shortage of fresh water, its extraction from such collectors becomes relevant. Dipole electrical installations are considered for solving the problem of prospecting and exploration of a freshwater reservoir in the water areas. Changes in electrical resistivity and polarizability are studied for the normal and anomalous models. Conclusions are drawn about the optimality of electromagnetic survey parameters for solving hydrogeological problems in water areas.

**Keywords:** subaqueous waters, electrical prospecting, electrical lines

### *Введение*

Пресные субаквальные воды представляют поисковый интерес в ряде регионов Земли. Для решения задач поиска и разведки пресноводных коллекторов на акваториях целесообразно использовать электроразведочные методы. При работах на акваториях имеется ряд выгод для реализации электроразведочных измерений, в частности, с электрическими линиями: во-первых, простые условия заземления, во-вторых, возможность осуществлять непрерывную регистрацию сигнала во время буксирования электроразведочной установки, в-третьих, возможность использовать мощные источники питания, большие, по протяжённости, измерительные и питающие линии, транспортировка которых не вызывает трудно-

стей. Интерпретацию полученных результатов упрощает относительная выдержанность ЭМ свойств первого слоя (морской воды), спокойная геоэлектрическая обстановка в верхней части разреза, возможность определения дополнительными измерениями мощности и проводимости водного слоя. Но вместе с тем существует ряд сложностей при проведении морских электроразведочных работ: хорошо проводящий слой морской воды экранирует нижележащие отложения, а гидродинамические процессы, протекающие в нём, приводят к появлению дополнительных помех [1]. На практике осуществлены способы уменьшения влияния на измерения такого вида помех: заглубление и натяжение кабеля косы, увеличение площади измерительных электродов [2], однако эти вопросы находятся за рамками описываемого исследования.

Для решения задачи рассмотрены дипольные электрические установки. Эффективные параметры электромагнитной съёмки исследованы на основании изменения удельного электрического сопротивления и поляризуемости аномальной геоэлектрической модели. Сделаны выводы об оптимальности параметров съёмки для решения гидрогеологических задач на акваториях.

Результаты исследования возможно использовать при проведении полевых работ.

Дальнейшую исследовательскую работу можно сосредоточить на усложнении геоэлектрической модели и проведение подобных исследований для геоэлектрических условий других регионов, например, Персидского и Аденского залива, Красного моря.

### *Методы и материалы*

В основе исследования численный эксперимент – сравнение результатов решения электромагнитной прямой задачи для нормальной и аномальной одномерной проводящей поляризующейся геоэлектрической модели (на примере Азовского моря).

Для расчётов сигнала на осевых установках использовался метод линейной фильтрации решения задачи ЭМ становления [3]. При расчётах первоначально вычислялась частотная характеристика сигнала в широком диапазоне частот, затем путем преобразования Фурье получалось решение во временной области. Учёт эффекта ВП осуществлён введением частотно зависимого УЭС формулой Коула-Коула [4] (1):

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left( 1 - \eta \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление на постоянном токе (Ом·м);  $\eta$  – коэффициент поляризуемости (доли ед.);  $\tau$  – постоянная времени (с);  $c$  – показатель степени;  $\omega$  – круговая частота (с<sup>-1</sup>).

Первый слой геоэлектрической модели – водная толща, без дополнительного рассмотрения, – это сильно проводящая однофазная и однородная среда, неполяризующаяся при протекании внешнего тока или возникновении внешнего

напряжения. Согласно инверсии полевых измерений, выполненных ранее, УЭС воды составляет 0,72 Ом·м. Такая величина УЭС соответствует минерализации воды 13,89 г/л (13,89 ‰). Мощность водного слоя в модели задана 10 м (по данным батиметрии средняя глубина составляет 12 м).

Ниже – 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 [5]. При заполнении песчаников пресными водами с минерализацией 1 г/л и менее УЭС слоя задано в 20 Ом·м (такое значение задано по данным каротажа, оно меньше, чем определено по палетке [5]). Мощность водоносного горизонта – 20 м.

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

Геологическим породам свойственно 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 [6]. 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	$\rho$ , Ом·м	$\eta$ , %	$\tau$ , с	C, б.р.	h, м
1	0,72	0			10
2	2	1	0,1	0,5	$\infty$

Таблица 2

Аномальная геоэлектрическая модель

Слой	$\rho$ , Ом·м	$\eta$ , %	$\tau$ , 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	$\infty$

Для демонстрации результатов моделирования используется распределение УЭС (Ом·м) и поляризуемости ( $m$ , мВ/В) с глубиной и трансформанта  $PI(t)$  (б.р.) во время переходного процесса. Время расчётов переходного процесса с 10 мкс до 15 с.

На трансформанте  $PI(t)$  нужно остановиться подробнее.

При измерениях во временной области в течение некоторого времени после выключения тока происходит становление ЭМ поля в земле и для определённых времён наблюдается суперпозиция индукционных и поляризационных эффектов [7]

Один из способов уменьшения проявления сигнала индукции в сигнале переходного процесса, при работе в осевой области горизонтальной электрической линии – трансформация измерений 3-х электродной измерительной линии  $M_1M_2M_3$  – отношение конечной разности переходного процесса ( $\Delta^2 U(t)_{M_1M_2M_3}$ ) и переходного процесса ( $\Delta U(t)_{M_1M_3}$ ) [8-10] (2).

$$PI(t)_{M_1M_2M_3} = \frac{\Delta^2 U(t)_{M_1M_2M_3}}{\Delta U(t)_{M_1M_3}} = \frac{\Delta U(t)_{M_1M_2} - \Delta U(t)_{M_2M_3}}{\Delta U(t)_{M_1M_2} + \Delta U(t)_{M_2M_3}}. \quad (2)$$

Трансформанта  $PI(t)$ , полученная в осевой области заземлённой линии, в поздней стадии становления подавляет составляющую сигнала, связанную со становлением, а на кривой отмечается временной интервал преобладания сигнала становления (нисходящая ветвь) и гальванически вызванной поляризации (восходящая ветвь), разделённые минимумом [10, 11].

Расчет прямой задачи для постоянного тока осуществлялся с помощью программы Res2DMod [12], а обратная задача решалась с помощью программы Res2Dinv [13]. Программное обеспечение для расчёта переходного процесса разработано ООО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания» (г. Иркутск).

### Результаты

Результатом исследования являются нормальные и аномальные сигналы на ряде осевых дипольных установок.

Результаты моделирования сигнала на постоянном токе показаны в виде восстановленных 2d инверсией разрезов УЭС и поляризуемости (m). В первом случае кровля пресноводного коллектора находилась на глубине 25 м ниже дна акватории (рис. 1). Во втором случае – на глубине 250 м (рис. 2).

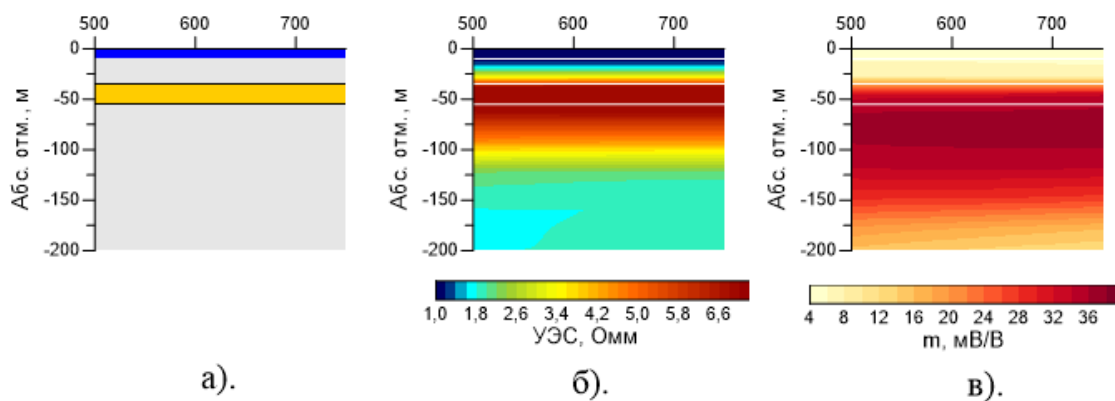


Рис. 1. Геоэлектрическая модель (а) и восстановленные в результате 2d инверсии разрезы УЭС (б) и поляризуемости (в) для модели с кровлей коллектора на глубине 25 м ниже дна акватории

Переходный процесс показан в виде изменения трансформанты  $PI(t)$  на нескольких разносах дипольной установки.

На рис. 3 приведены графики  $PI(t)$  для модели с кровлей пресноводного коллектора на глубине 25 м для установок с длиной источника 250 м. Графики соот-

ветствуют нормальной и аномальной по УЭС и по УЭС и поляризуемости моделям. На рис. 4 приведены графики  $P1(t)$  для модели с кровлей пресноводного коллектора на глубине 250 м для установки с длиной источника 500 м.

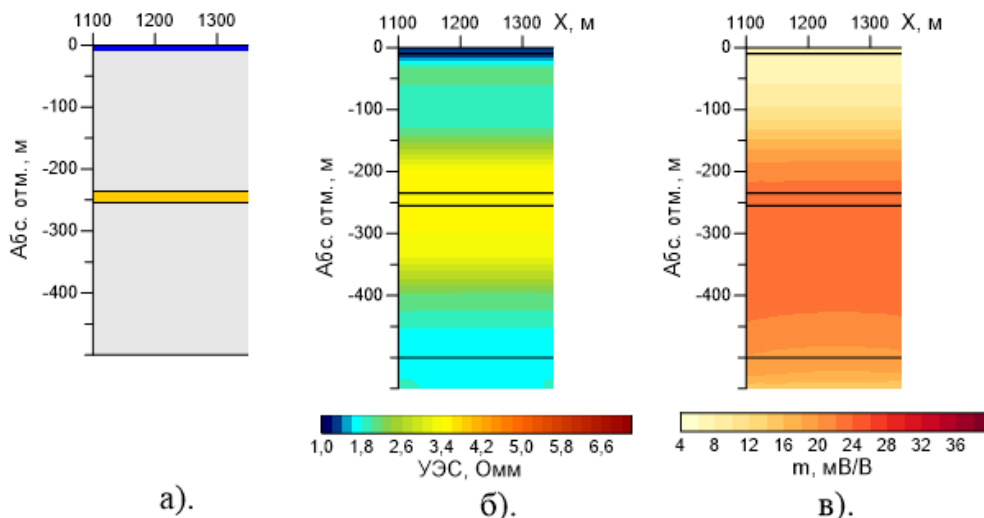


Рис. 2. Геоэлектрическая модель (а) и восстановленные в результате 2d инверсии разрезы УЭС (б) и поляризуемости (в) для модели с кровлей коллектора на глубине 250 м ниже дна акватории.

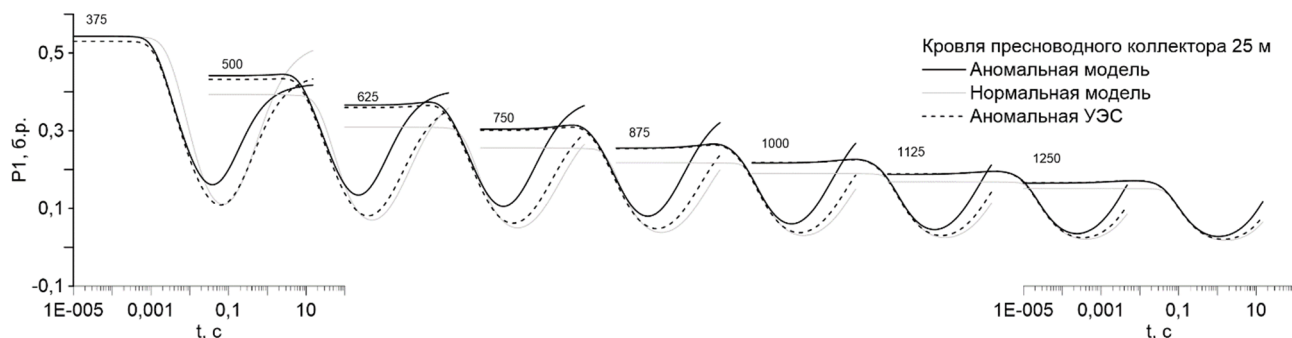


Рис. 3. Трансформанта  $P1(t)$  для дипольной установки с длиной источника 250 м. Индекс кривой – разнос (м).

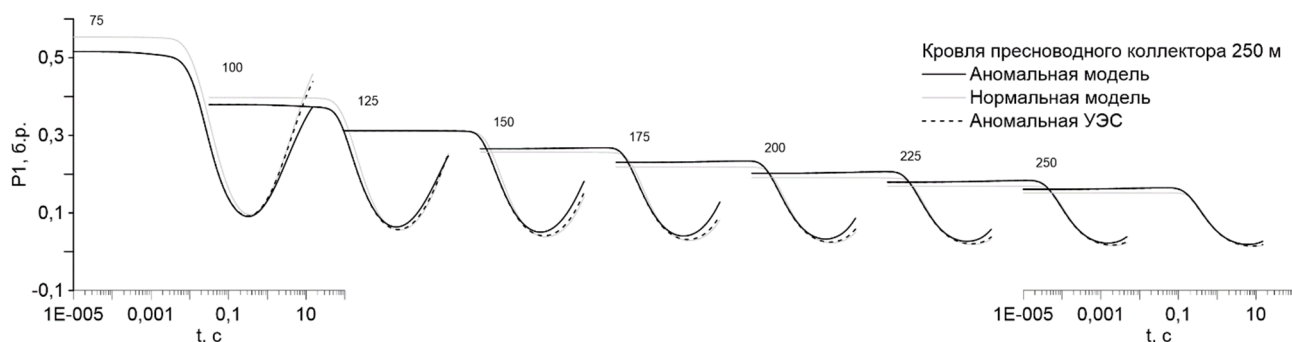


Рис. 4. Трансформанта  $P1(t)$  для дипольной установки с длиной источника 500 м. Индекс кривой – разнос (м).

Для оценки глубинности исследования поля становления возможно использовать эффективную глубину [14] (3) – до этой глубины геологическая среда (в виде однородного полупространства) индуцирует сигнал становления.

$$z_{эф} \approx \frac{1}{4\pi} \sqrt{10 \cdot \frac{8t\rho}{\mu_r}} \approx 0.71 \sqrt{\frac{t\rho}{\mu_r}}, \quad (3)$$

где  $z_{эф}$  – в км,  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление полупространства,  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость, для немагнитных пород равная 1,  $t$  – время регистрации становления (с).

Эффективная глубина изменяется с течением времени становления. Так для полупространства с УЭС 2 Ом·м эффективная глубина на времени 100 мкс составляет около 10 м, на времени 1 мс – 30 м, 10 мс – 100 м, 100 мс – 300 м, 1 с – 1000 м. По минимуму кривой  $PI(t)$  можно видеть до какого времени сигнал становления преобладает над сигналом гальванически вызванной поляризации, а значит до этого времени сигнал определяется распределением УЭС среды, позднее о зондировании полем становления говорить нельзя, т.к. преобладает сигнал, определяющийся поляризуемостью среды. Для установки с длиной источника 250 м минимум  $PI(t)$  для ближнего измерителя наблюдается на времени порядка 50 мс, эффективная глубина для этого времени составляет 230 м, т.е. проводить зондирование становлением возможно до этой глубины. Установкой с длиной источника 500 м возможно проводить зондирование становлением поля до глубины порядка 400 – 500 м.

### *Обсуждение*

Интересующий объект контрастно проявляется в измерениях на постоянном токе при глубине кровли от 25 до 100 м, при увеличении глубины кровли до 250 и 500 м влияние объекта становится менее чётким. При инверсии УЭС положение кровли и подошвы коллектора выделяется с большой погрешностью. В разрезах  $m$  хорошо выделяется только кровля коллектора при глубине её залегания от 25 до 100 м.

Для измерений во время переходного процесса ( $PI(t)$ ) дипольной установкой на графиках можно отметить проявление ранней стадии переходного процесса (РСПП). Она проявляется как асимптота  $PI(t)$  на ранних временах. Во время РСПП вихревой ток наследует распределение гальванического тока, поэтому проявление объекта во время этой стадии переходного процесса сопоставимо с его проявлением на постоянном токе. Далее протекает процесс становления поля во время этой стадии переходного процесса объект проявляется только на ближних к источнику измерителях, при увеличении разноса различие нормальных и аномальных кривых исчезает. Во время преобладания сигнала ВП объект контрастно так же проявляется на ближних измерителях, при увеличении разноса аномальный эффект уменьшается. В измерениях переходного процесса объект проявляется контрастно при глубине залегания кровли от 25 до 250 м.

### *Заключение*

Измерения на постоянном токе дипольными установками для выделения субаквального пресноводного коллектора эффективны при глубине кровли до 100 м, при погружении кроли аномальный эффект значительно уменьшается, при инверсии УЭС слабо проявляется подошва коллектора.

В инверсии поляризуемости контрастно проявляется кровля объекта при глубине залегания до 100 м.

В трансформанте  $PI(t)$  во время переходного процесса более контрастно объект выделяется на ближних измерителях, как в становлении, так и в ВП. При увеличении разноса аномальный эффект уменьшается. В сигнале ВП объект проявляется более контрастно для установки с длиной источника 250 м, а в сигнале становления – с длиной источника 500 м. На данном этапе исследований видно, что объект чётко выделяется при глубине кровли от 25 до 250 м, при погружении кровли аномальный эффект ослабевает.

### ***Благодарности***

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

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Маловицкий Я.П., Гагельганц А.А., Коган Л.И. Морские геофизические исследования. – М. : Недра. – 1977. – 375 с.
2. Ситников А.А., Иванов С.А., Жуган П.П., Мальцев С.Х., Агеенков Е.В. Аппаратура, устройства и системы наблюдений для решения нефтегазопроисловых и инженерно-геологических задач на акваториях электроразведочными методами ДНМЭ и НДЭМЗ // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2017. – №2. – С. 34–41.
3. Петров А.А. Возможности метода становления электрического поля при поисках углеводородов в шельфовых зонах // Геофизика. – 2000. – №5. – С. 21–26.
4. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. – 1978. – V. 43. – P. 588–609.
5. Шарапанов Н.Н., Черняк Г.Я., Барон В.А. Методика геофизических исследований при гидрогеологических съемках с целью мелиорации земель. – М.: Недра. – 1974. – 176 с.
6. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. – Л.:Недра. – 1980. – 391 с.
7. Уэйт Дж.Р. Геоэлектромагнетизм. М.:Недра – 1987 – 235 с.
8. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Дифференциально-нормированный метод электроразведки при прямых поисках залежей углеводородов // Геофизика. – 1995. – № 4. – С. 42–45.
9. Легейдо П.Ю., Мандельбаум М.М., Рыхлинский Н.И. Информативность дифференциальных методов электроразведки при изучении поляризующихся сред // Геофизика. – 1997. – №3. – С. 49–56.
10. Легейдо П.Ю. Теория и технология дифференциально-нормированной геоэлектроразведки для изучения поляризующихся разрезов в нефтегазовой геофизике. Дис. на соиск. уч. ст. д. г.-м. н. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1998. – 198 с.
11. Агеенков Е.В., Ситников А.А., Пестрев И.Ю., Попков А.В. О проявлении процессов индукционного становления и вызванной поляризации при работе с осевой и симметричной электрическими установками // Геология и геофизика. – 2020. – Т. 61. – № 7. – С. 976–991.
12. Loke M. H. RES2DMOD ver. 3.01 Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite-elements method. Geotomo Software. // Manual. – 2002.
13. Loke M. H. RES2DINV ver. 3.55, Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squares method // Software manual. – 2006.
14. Матвеев Б.К. Электроразведка. – М.:Недра. – 1990. – 368 с.