
**МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 550.837.3; 550.8.014; 504.064.3

**МОНИТОРИНГ МИГРАЦИИ НЕФТЕПРОДУКТА В ЛАБОРАТОРНЫХ
УСЛОВИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ
ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ**

© 2017 г. П. А. Рязанцев***, М. В. Нилова*, Д. М. Белохвостик**

**Институт геологии Карельского научного центра РАН, лаборатория геофизики,
ул. Пушкинская, д.11, Петрозаводск, 185910 Россия.*

E-mail: chthonian@yandex.ru

***Петрозаводский государственный университет, кафедра геологии и геофизики,
пр-т Ленина, д.33, Петрозаводск, 185910 Россия.*

Поступила в редакцию 06.05.2016 г.

После исправления 7.12.2016 г.

В статье приведены результаты лабораторного эксперимента по определению возможностей электротомографии для изучения миграции нефтепродукта в дисперсном грунте. Эксперимент выполнен в модельной ячейке (пластиковый бак размерами 2000 × 700 × 600 мм), заполненной мелкозернистым, однородным песком, в котором заложен наклонный пласт глины (угол наклона 20°). В качестве вещества-загрязнителя использовалось отработанное машинное масло. Установлено, что удельное электрическое сопротивление (УЭС) мелкозернистого песка при изменении влажности от 15 до 30% возрастает при увеличении процентного содержания машинного масла в нем; зависимость носит явно не линейный характер (использовался полином для построения линии тренда). Это объясняется распределением воды и масла в поровом пространстве песка и изменением направления протекания электрического тока. Массоперенос загрязнителя происходил за счет водного потока вдоль глинистого водоупора под действием гравитационных сил. Сбор данных выполнен методикой электротомографии с посуточным интервалом измерений. Всего получено 4 модели, отражающие распределение УЭС среды 1 раз в 24 часа. Измерения выполнялись аппаратурой СКАЛА-48М с использованием электроразведочной установки Шлюмберже, с шагом по профилю 50 мм. Обработка массива данных осуществлялась при помощи *time-lapse* инверсии. Показано, что переотложение нефтепродукта уверенно фиксируется по показателям УЭС. Дополнительно исследовано влияние приповерхностных техногенных помех на информативность получаемых геоэлектрических моделей электротомографии. Обоснована возможность использования методики электротомографии для локализации областей, зараженных нефтепродуктами, и проведения мониторинговых исследований при геоэкологических изысканиях.

Ключевые слова: *электротомография, загрязнение, нефтепродукт, удельное электрическое сопротивление, геоэлектрическая модель, миграция, лабораторная ячейка, мониторинг.*

ВВЕДЕНИЕ

Современные урбанизированные территории относят к числу самых загрязненных областей окружающей среды. Значительную опасность для живой природы, в том числе и человека, представляют нефть и продукты ее переработки [3]. Можно выделить значительное количество техногенных объектов, с которыми связано попадание нефтепродуктов в геологическую среду. В первую очередь к ним относятся такие структуры нефтедобывающего комплекса, как резервуары и нефтепроводы, а также автозаправочные станции, мазутохранилища тепловой энергетики, производственные склады и т.д.

Действующие государственные нормы естественной убыли допускают потери нефтепродуктов из мест длительного хранения. Вследствие значительного срока эксплуатации и большой степени износа подобных резервуаров объем утечек может достигать 0.5–1%. Это приводит к формированию очагов загрязнений в геологической среде, при этом трансформация и миграция нефтепродуктов под воздействием внешних факторов осложняет их идентификацию и локализацию. Процесс ликвидации загрязнений выполняется тремя основными способами: отсыпкой свежим грунтом, изъятием зараженных пород и микробиологической деструкцией

[3, 5]. Как отмечается в [5], во всех случаях крайне важна локализация области загрязнения.

Перспективный способ дистанционной оценки территорий, подвергнутых загрязнению нефтепродуктами, определения зон их наибольшей концентрации и мониторинга миграции – геофизические методы, главным образом, электроразведка [2, 28]. Применение электроразведочной геофизики обусловлено тем, что нефтепродукты контрастно выделяются при контаминации в дисперсных грунтах по показателям удельного электрического сопротивления (УЭС) [21, 27], уровню вызванной поляризации [6, 24] и диэлектрической проницаемости [17]. Важно отметить, что по геоэлектрическим свойствам выделяются две формы нахождения нефтепродуктов в среде. Первая форма относится к “свежим” загрязнениям, для которых наиболее характерны высокие значения УЭС, так как в чистом виде нефть и ее производные – диэлектрики. Вторая форма – это нефтепродукты, которые подверглись биодеградации. В этом случае происходит изменение минерализации воды, образование биопленок, частичное растворение вмещающих пород и т.д. В результате возникает целый ряд эффектов, которые имеют отражение в геоэлектрических полях [8, 11, 23]. Большой вклад в развитие геоэкологического мониторинга нефтяных загрязнений методами геофизики внесли E. Atekwana, W. Sauck, P. Sentenac, D. Rucker, A. Ramirez, L. Slater, M. Schmutz, A. Revil, В.А. Шевнин, И.Н. Модин, А.А. Рыжов, К.В. Титов и др.

С развитием технических средств малоуглубинные методы электроразведки вышли на новый качественный уровень, например, современная модификация метода сопротивлений на постоянном токе – электротомография. Для электротомографии используется специальная система сбора и обработки данных, заключающаяся в создании единого массива значений УЭС изучаемых пород с последующим подбором геоэлектрической модели [1]. Получаемые значения имеют высокую плотность, что позволяет построить детальный геоэлектрический разрез исследуемой геологической среды. Существует множество научных публикаций, где показана высокая эффективность электротомографии для локализации загрязненных областей на различных техногенных объектах [14, 16, 19].

Цель представленных исследований – оценить возможности электротомографии для мониторинга миграции нефтепродуктов на основе лабораторного моделирования. Для этого на примере процессов смещения загрязнения под действием водного потока в экспериментальной ячейке (баке), решались следующие задачи: изучалось изменение УЭС дисперсного грунта разной влажности при насыщении

нефтепродуктом; определялись параметры сбора и обработки электроразведочных данных; выполнялось геоэлектрическое моделирование; проводилась интерпретация результатов на основе установленных зависимостей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящее время лабораторное моделирование различных геологических систем эффективный способ для определения зависимостей между геологическими и геофизическими параметрами, выявления прямых и косвенных помех, отработки методик сбора и обработки информации с целью получения более достоверных результатов. Подобные исследования активно проводятся и для электротомографии. Так, например, Ф. Сентенаком (Philippe Sentenac) совместно с коллегами выполнен ряд экспериментов в баке, в том числе и по изучению миграции нефтяного загрязнения. Важно отметить, что исследования, показанные в данной статье, выполнены на основе способа, предложенного в работах [25, 26]. При этом, в изначальную методику были внесены следующие дополнения: детально изучено УЭС песка разной влажности и разной насыщенности нефтепродуктом; использовалась модель включающая различные техногенные объекты; инверсия полученных данных выполнялась по технологии *time-lapse*.

Для выполнения эксперимента была изготовлена измерительная ячейка – пластиковый бак (2000 × 700 × 600 мм), в котором была смоделирована простейшая геологическая ситуация (рис. 1). Через мелкозернистый песок происходила фильтрация воды под действием гравитационных сил, в качестве водоупора использован глинистый слой (однородная строительная глина) мощностью 100 мм с наклоном 20° (рис. 2А). Вмещающий песок имел следующий минеральный состав: кварц – 64%, плагиоклаз – 18%, глинистое вещество – 16%, тонкозернистые агрегаты – 2%. Модуль крупности песка – 1.67, коэффициент фильтрации – 6.5 м/сут. В баке устроен профиль наблюдения длиной 1500 мм (рис. 2В), в пределах которого на расстоянии 250 мм от первого пикета (ПК) сделана инъекция нефтепродукта (рис. 2Б).

В качестве вещества-загрязнителя использовалось отработанное машинное масло. Его выбор обусловлен отсутствием легколетучих фракций (уменьшение потерь от испарения) и приемлемой вязкостью (относительно равномерное распределение в грунте). В справочнике [4] показано, что большинство неизменных углеводородов и нефтепродуктов имеют сопротивления от

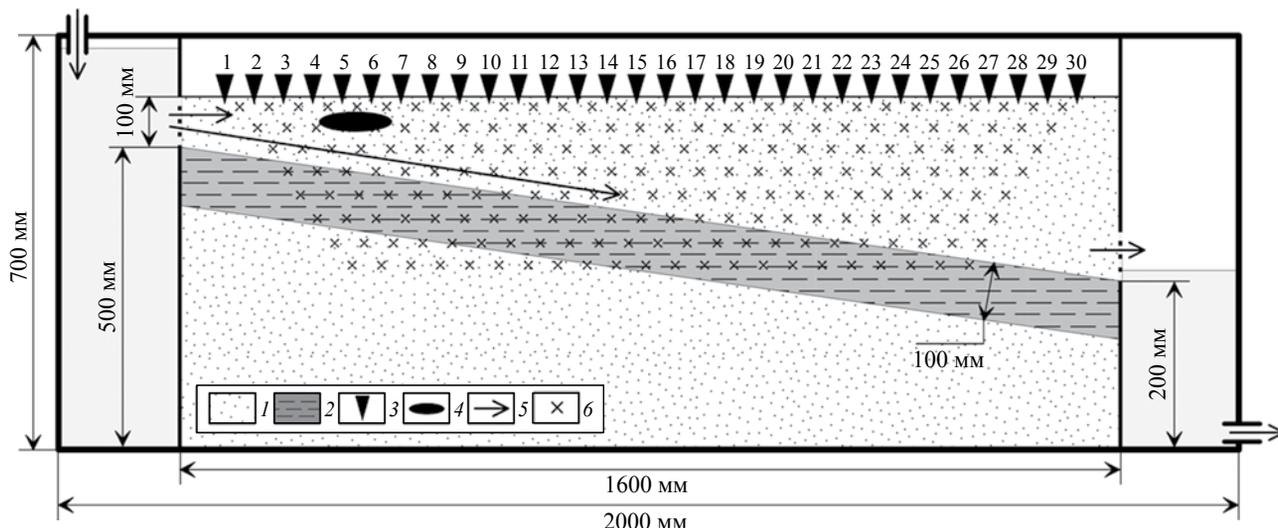


Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки: 1 – вмещающий песок; 2 – глина; 3 – пикеты наблюдений; 4 – инъекция нефтепродукта; 5 – направление течения воды; 6 – точки замеров.

$0.5 \cdot 10^{11}$ Ом · м и выше. Отсюда следует, что любое вещество из них будет создавать в среде аномалию высоких сопротивлений, а результаты, полученные с использованием машинного масла, будут верны и для других нефтепродуктов. Важную роль при мониторинге миграции загрязнения играет его подвижность. Выделяют два вида углеводородов – легкие и тяжелые (в зарубежной печати LNAPL и DNAPL), которые характеризуются

разными моделями распространения, например, рассматриваемые в [17]. Машинное масло относится к легким углеводородам (LNAPL), модель его переноса будет показана ниже.

Изучение модельной среды в экспериментальной ячейке выполнялось методикой электротомографии при помощи электроразведочной аппаратуры СКАЛА-48М. Автоматический коммутатор переключения электродов не использовался, электроды

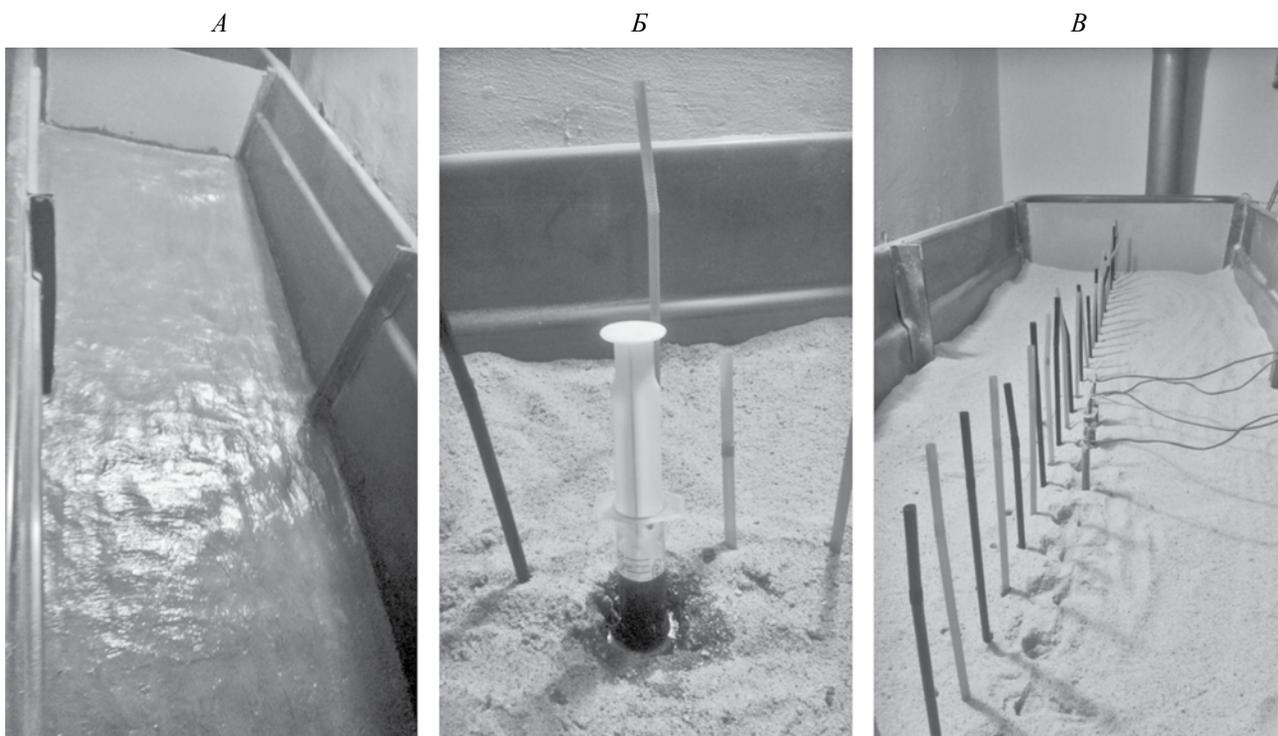


Рис. 2. Фотографии лабораторного бака: А – слой глины; Б – инъекция нефтепродукта; В – измерение УЭС по профилю.

перемещались по намеченным пикетам в ручном режиме. Сбор данных осуществлялся симметричной электроразведочной установкой А-М-N-B (так называемая установка Шлюмберже). Шаг по профилю составлял 50 мм. Формировался единый массив, включающий УЭС четырех циклов измерений по 204 значения в каждом. Далее в программе ZondRes2d выполнялась *time-lapse* (покадровая) инверсия. При использовании такой техники обработки каждая модель (кадр) рассчитывается с учетом соседних моделей [18]. Покадровая инверсия – эффективный инструмент методики электротомографии, позволяющий исследовать динамические процессы геологической среды, такие как: вариация уровня грунтовых вод [13], изменение солёности [15], а также осуществлять геоэкологический мониторинг [22]. Получаемый в результате набор геоэлектрических моделей показывает, как изменяется УЭС с течением времени.

ЗАВИСИМОСТЬ УЭС ОТ СОДЕРЖАНИЯ НЕФТЕПРОДУКТА В ПЕСКЕ

В качестве первого этапа исследований была определена зависимость между УЭС песка и его насыщенностью нефтепродуктами. Общее УЭС (или обратная ему величина – проводимость) дисперсных грунтов комплексный показатель, на величину которого влияет ряд факторов, таких как пористость, влагонасыщенность, минерализация поровой влаги и температура. Наиболее известное уравнение, описывающее эти параметры – Арчи-Дахнова, где показано влияние электролитической проводимости, т.е. минерализации поровой влаги и пористости породы на уровень УЭС. Кроме того, широко используется модель Ваксмана-Смита (*Waxman-Smith*), а также ряд ее модификаций [20]. Эта модель акцентирована на зависимости проводимости от двойного электрического слоя (ДЭС), образующегося на границе раздела жидкой и твердой фазы (главным образом, глинистых частиц). Существуют и иные вспомогательные модели, которые описывают закономерности изменения УЭС дисперсных грунтов. Например, палетка Рыжова-Шевнина [9], рассматривающая влияние глинистости и минерализации влаги.

Измерения электрического сопротивления песка выполнялись в специальной ячейке, состоящей из двух круглых пластин, между которыми с определенным усилием зажимался образец фиксированного объема, а резистивиметром измерялось сопротивление. Зная диаметр пластин ($d = 45$ мм) и расстояние между ними ($l = 50$ мм) можно перейти от простого

сопротивления к УЭС. Влага вносит значительный вклад в УЭС грунта, поэтому портативным кондуктометром СОМ-100 была измерена проводимость водопроводной воды используемой в эксперименте – $\sigma_{cp} = 90$ мкС/см, минерализация = 60 мг/л (при $T = 25^\circ\text{C}$). Полученные показатели свидетельствуют о небольшой минерализации воды. Как следствие для всех выполненных измерений характерны относительно высокие значения УЭС. Для выявления графика зависимости промерялся набор образцов разной влажности и с разным содержанием нефтепродукта. Важно отметить, что зависимость влажности и УЭС не линейна. Согласно [20], наибольшее влияние на УЭС дисперсных грунтов оказывает изменение влажности в интервале $0 \div 10\%$, в такой ситуации при ее увеличении УЭС может уменьшиться на несколько порядков. При влажности более 10% изменение УЭС не столь резкое. Поэтому для сглаживания влияния поровой влаги использовались образцы с ее содержанием от 15 до 30%, контроль за которым осуществлялся влагомером МГ-44. Как отмечается в [23], замещение жидкой фазы углеводородами редко превышает 50%. В случае эксперимента, насыщение нефтепродуктом происходило в процентах относительно объема образца и максимальные значения составили 22%.

При интерпретации, исходя из обобщенных данных [9, 11, 12, 23], за основу взята следующая упрощенная схема электропроводности песка при насыщении нефтепродуктами:

1) в песке, имеющем поровое пространство, заполненное водой малой минерализации без примеси нефтепродуктов (рис. 3А), преобладает электролитическая проводимость;

2) в песке, поровое пространство которого частично заполнено неизменным нефтепродуктом (рис. 3Б), электрический ток отжимается к стенкам капилляров, проводимость возрастает под влиянием ДЭС (поверхностная проводимость);

3) в песке с поровым пространством, заполненным нефтепродуктами (рис. 3В), и часть капилляров в котором перекрыта, проводимость начинает уменьшаться.

В результате измерений получены зависимости УЭС от относительного объемного содержания нефтепродукта (рис. 4) при разной влажности образцов. Для каждого набора значений вычислена линия тренда. Следует отметить, что тренд имеет явно не линейный характер, поэтому критерием для его выбора была степень достоверности аппроксимации. Оптимальный результат получен для полинома 3-й степени ($R^2 = 0.8$ и больше). Все графики в первом приближении имеют сходную форму изменения. На первом этапе образцы разделяются по УЭС исходя из

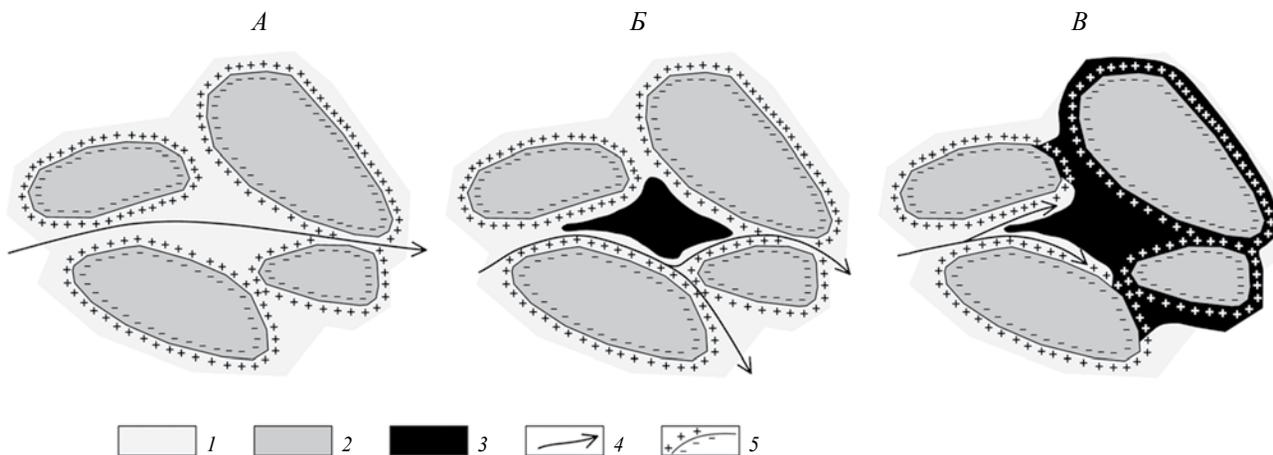


Рис. 3. Схема электропроводимости песка при насыщении нефтепродуктами: песок: А – ненасыщенный; Б – малонасыщенный; В – насыщенный. 1 – вода; 2 – минеральные зерна; 3 – нефтепродукт; 4 – условное направление электрического тока; 5 – двойной электрический слой.

содержания влаги, так как проводимость электролитическая (см. рис. 3А). При содержании нефтепродукта от 3% (для влажности 30%) до 8% (для влажности 15%) происходит локальное уменьшение УЭС. Этот эффект приурочен к возникновению поверхностной проводимости за счет ДЭС (см. рис. 3Б). Далее происходит асимптотическое нарастание сопротивления, что соответствует закрытию капилляров (см. рис. 3В). Интересен тот факт, что при внесении нефтепродуктов в более влагонасыщенные образцы

УЭС возрастает интенсивнее в сравнении с менее увлажненными образцами. Возможно, это обусловлено параметрами емкости капиллярно-порового пространства песка. При увеличении содержания воды в порах происходит вытеснение масла из центра пор в капилляры. Вследствие чего происходит перекрытие каналов проводимости электрического тока нефтепродуктом, и УЭС увеличивается интенсивнее, несмотря на большую степень водонасыщения грунта.

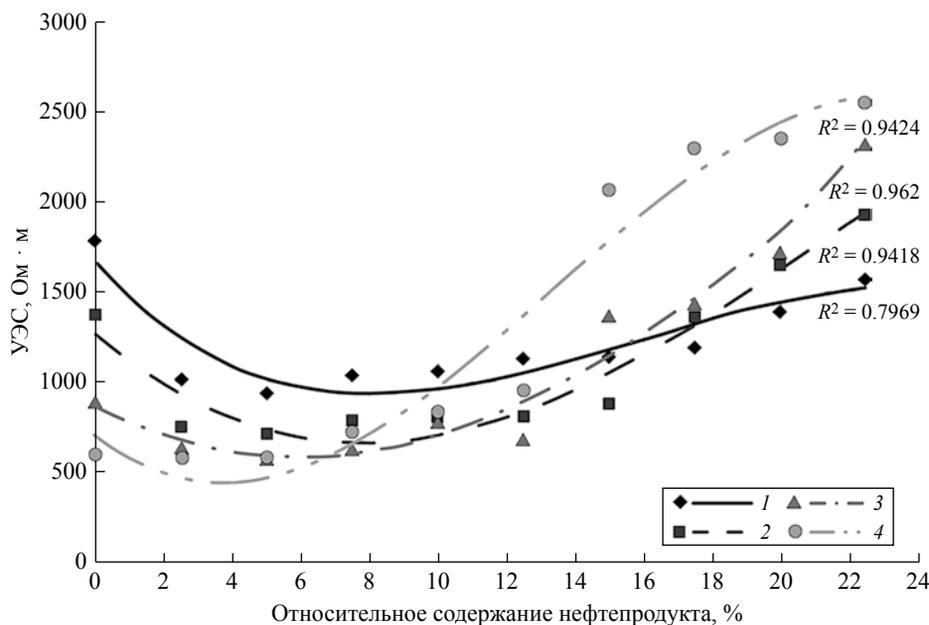


Рис. 4. Графики зависимости УЭС песка от содержания нефтепродукта при его влажности (в %): 1–15; 2–20; 3–25; 4–30.

МОНИТОРИНГ МИГРАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Как сообщается в [7], нефтепродукты при попадании в грунт распространяются в двух направлениях: вниз под действием гравитации и вширь под действием капиллярных сил. Скорость их массопереноса зависит от состава грунта, его пористости, движения воды и т.д. Пример модели переноса нефтепродуктов предложен в [12]. В ней выделяется 4 фазы нахождения нефтепродуктов в дисперсных грунтах (рис. 5). Наиболее быстро распространяющаяся – фаза контаминированного нефтепродукта ниже уровня грунтовых вод. Остаточная и свободная фаза, в свою очередь, концентрируют самое большое количество нефтепродукта. Исходя из рассматриваемой модели, следует ожидать возникновение двух зон с различным уровнем аномалий УЭС.

С целью оценки возможностей электротомографии для проведения мониторинга загрязнения нефтепродуктами был выполнен эксперимент, основанный на инъекции в модельную среду отработанного машинного масла с последующим контролем его смещения. Впрыск объемом 200 мл осуществлялся в приповерхностную часть на глубину 20 мм на ПК 0.25. После чего запускался процесс естественной фильтрации воды через грунт под действием гравитационных сил. Нормальный уровень УЭС песка, насыщенного водой, – 500 Ом·м. Затем выполнялись электротомографические измерения с последующим расчетом четырех геоэлектрических моделей, погрешность подбора которых при покადровой инверсии составила 7%.

На геоэлектрическом разрезе, полученном через 1 сут (0 ч), место впрыска нефтепродукта выражено аномалией УЭС равной 3500 Ом·м (рис. 6). Уверенно выделяется направление массопереноса загрязнения вдоль уровня грунтовых вод (смещение фазы растворения), что выражается повышением УЭС в интервале 700–1000 Ом·м. Через 48 час на ПК 0.5 формируется новый локальный максимум с УЭС = 2000 Ом·м (горизонтальное смещение свободной фазы). На заключительном этапе измерений

(72 ч) между ПК 1–1.3 формируется новая область повышенных значений УЭС = 1000 Ом·м, появление которой обусловлено переотложением нефтепродукта. Отмечается незначительное уменьшение интенсивности аномалий УЭС загрязненных областей с течением времени на фоне увеличивающейся влажности (табл. 1). При этом область их распространения увеличивается. Подобный эффект наблюдался и в работе [25]. Это связано с постепенным проникновением нефтепродукта в каналы проводимости под действием капиллярного эффекта с последующим их закупориванием.

Для контроля выполненных исследований применялся прямой отбор проб из различных областей бака, параметрические измерения их УЭС в ячейке (рис. 7) и сопоставление с заключительной геоэлектрической моделью (72 ч). Результаты сопоставления представлены в табл. 2. При сравнении модельных и параметрических УЭС видно, что значения имеют расхождение на 100–300 Ом·м, но при этом сохраняется общая динамика изменения проводимости среды. Это позволяет сделать вывод об адекватности смоделированного разреза.

МОНИТОРИНГ НЕФТЕПРОДУКТА ПРИ НАЛИЧИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ

Урбанизированные территории представляют собой достаточно сложные районы для применения малоглубинных методов электроразведки. Это связано с наличием большого количества локальных и линейных техногенных объектов из различных материалов, таких как водопроводные коммуникации, электрические сети и т.п., которые выступают в качестве приповерхностных неоднородностей (ППН). В методе электроразведки на постоянном токе влияние ППН зачастую во много раз сильнее влияния глубинных неоднородностей, являющихся целью поиска [10]. Для оценки искажений привносимых ППН в лабораторном баке была смоделирована ситуация, когда в исследуемом разрезе перпендикулярно профилю наблюдения присутствуют:

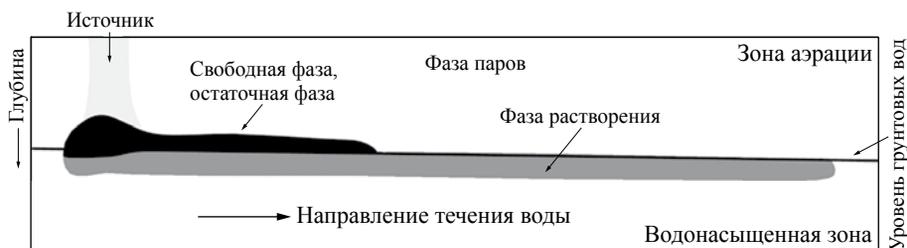


Рис. 5. Модель распространения нефтепродуктов под действием потока воды [11].

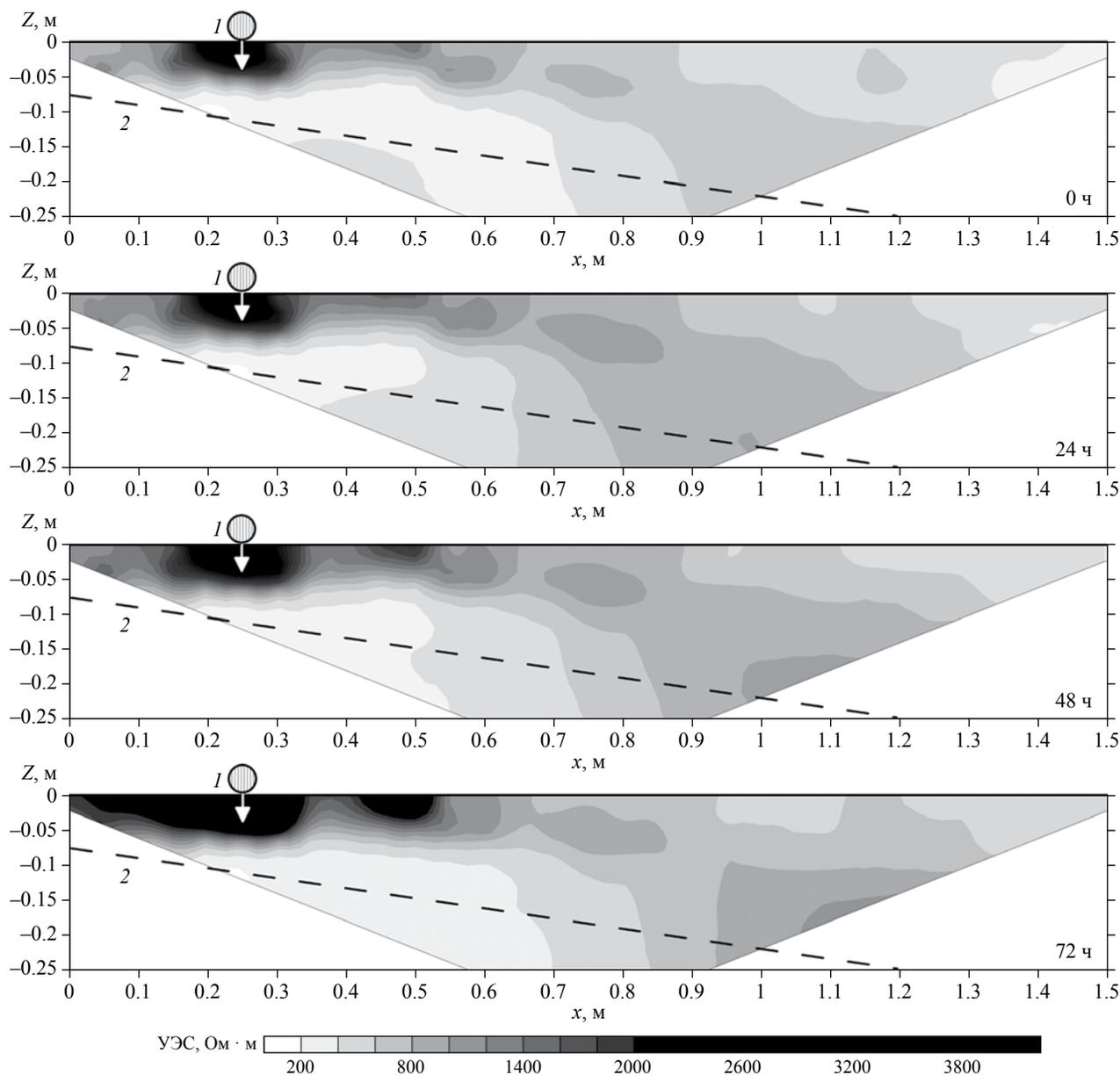


Рис. 6. Геоэлектрический мониторинг миграции нефтепродукта в песке: 1 – место начальной инъекции нефтепродукта; 2 – положение глинистого водоупора.

Таблица 1. Изменение влажности и УЭС в модельном баке с течением времени

Параметры	0 ч	24 ч	48 ч	72 ч
Осредненная влажность на глубине 20 мм, %	30.8	33.4	37	46.7
Осредненная влажность на глубине 100 мм, %	33.2	39.5	37.6	48.8
УЭС области впрыска нефтепродуктов, Ом·м	4400	4200	4000	3800

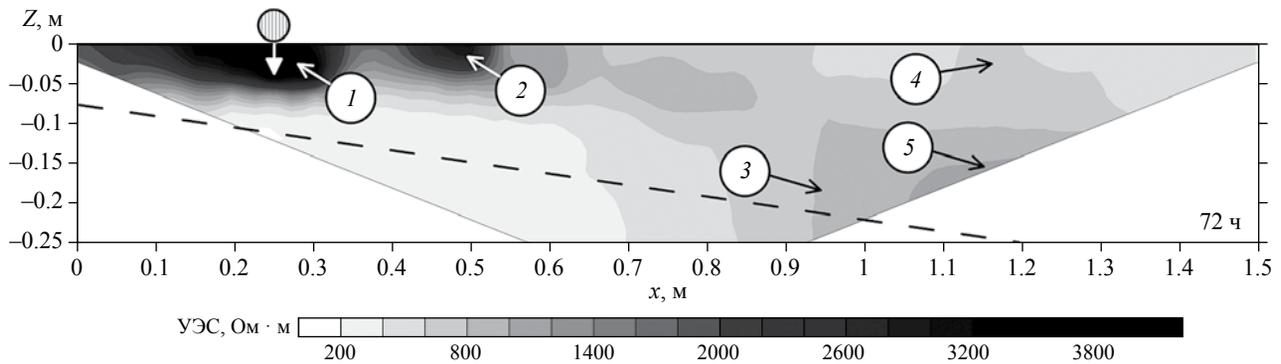


Рис. 7. Геоэлектрическая модель (72 ч) с нанесенными точками отбора и номерами проб.

Таблица 2. Сопоставление УЭС геоэлектрической модели и параметрических измерений

Номер пробы	Модельное УЭС, Ом·м	Параметрическое УЭС, Ом·м
Проба 1	3800	4187
Проба 2	2600	2460
Проба 3	900	1291
Проба 4	650	901
Проба 5	1000	1233

- пластиковая полая внутри труба диаметром $d = 50$ мм (рис. 8А) – объект с высоким сопротивлением; глубина залегания верхней кромки 50 мм;

- металлическая рейка сечением 15×25 мм (рис. 8Б) – проводящий объект; глубина залегания верхней кромки 120 мм;

- пара стандартных кирпичей размером 70×120 мм (рис. 8В) – барьер для распространения нефтепродуктов; глубина залегания верхней кромки 100 мм.

На рис. 9 показан набор геоэлектрических моделей, полученных в новых экспериментальных условиях,

но при сохранившейся методике сбора и обработки данных. Внедрение ППН привело к увеличению погрешности подбора моделей до 15%. В начальный момент времени (0 ч) первичная инъекция нефтепродукта на ПК 0.25 проявляется относительно слабо ($УЭС = 1200$ Ом·м). Что же касается ППН, то пластиковая труба проявляется на ПК 0.4 повышенным значением $УЭС = 1500$ Ом·м, а проводник и кирпичный барьер однозначно себя не проявили. В области их локализации между ПК 0.7–1 формируется протяженная аномалия $УЭС = 1200$ Ом·м, которая, вероятно, может быть следствием влияния ППН.

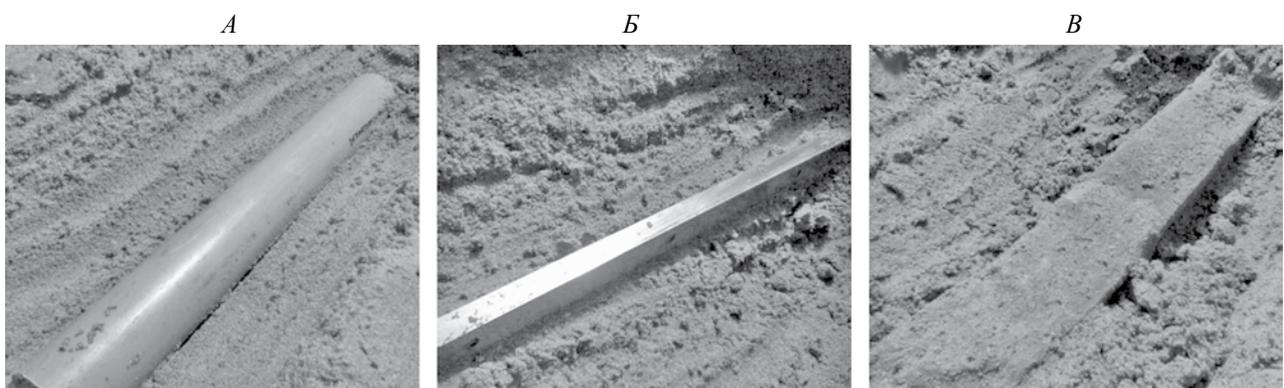


Рис. 8. Фотографии техногенных объектов, выступающих в качестве ППН: А – пластиковая труба; Б – металлическая рейка; В – кирпичный барьер.

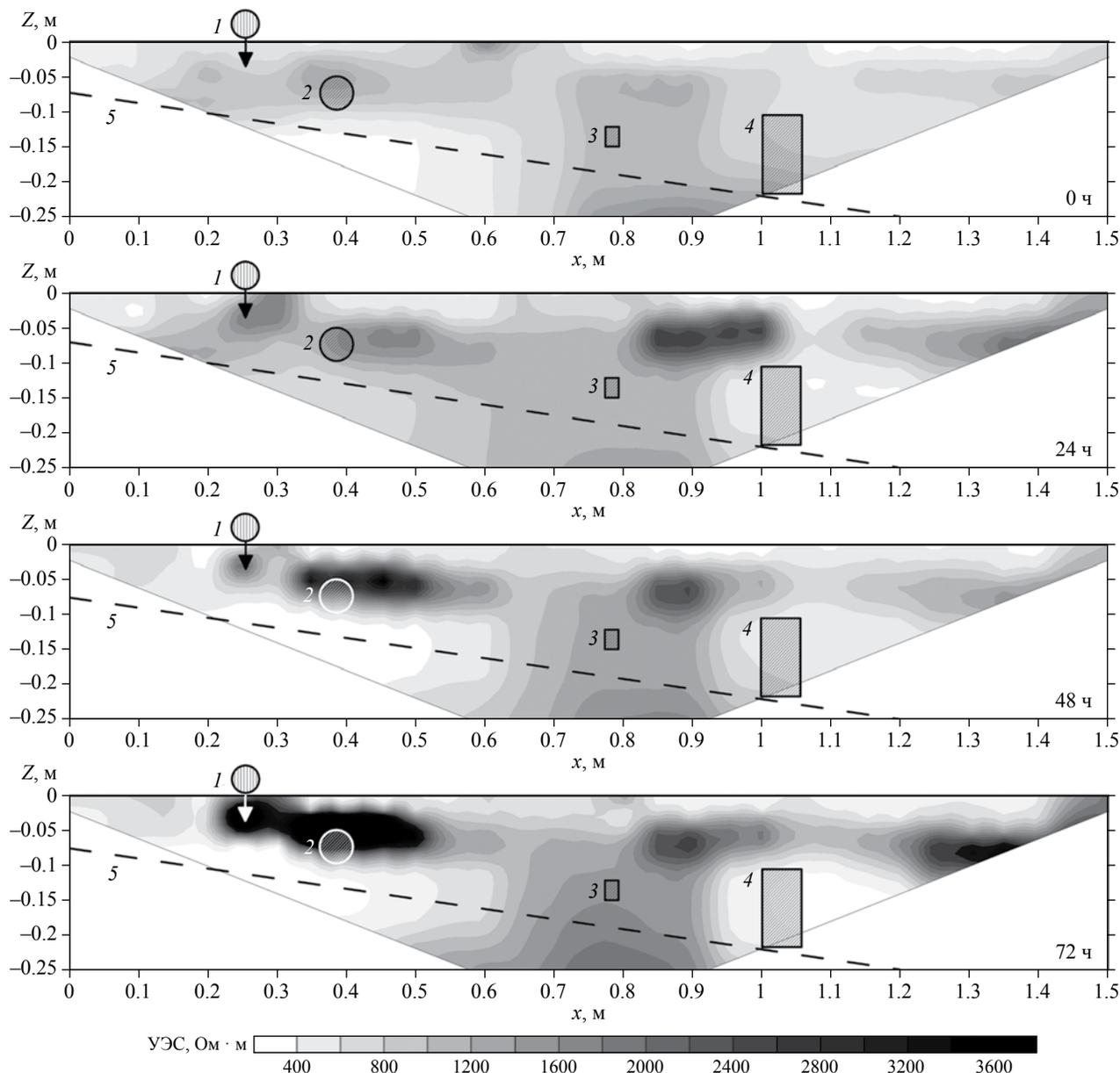


Рис. 9. Геоэлектрический мониторинг миграции нефтепродукта в песке с техногенными локальными неоднородностями: 1 – место начальной инъекции нефтепродукта; 2 – положение пластиковой трубы; 3 – положение металлической рейки; 4 – положение кирпичного барьера; 5 – глинистый водоупор.

По мере увеличения времени нахождения нефтепродукта в грунте контрастность его УЭС начинает возрастать. На второй модели (24 ч) оно равняется 1800 Ом · м, на третьей (48 ч) 3000 Ом · м, а на заключительной (72 ч) в среднем 3600 Ом · м. Отмечается, что амплитуда аномалий увеличивается не только на месте впрыска загрязнителя, но и в области расположения пластиковой трубы (интервал ПК 0.2–0.5). Это позволяет предположить, что локальные объекты могут выступать в качестве своеобразных концентраторов нефтепродуктов при их массопереносе в дисперсном грунте под действием воды.

Также интересно изменение поля УЭС в районе расположения кирпичного барьера (ПК 1–1.07). Как уже отмечалось, на первой модели (0 ч) он себя не проявил. Однако при прошествии определенного временного периода видно, как повышается УЭС вышележащей части грунта с 700 до 1500 Ом·м, а УЭС области за барьером остается равной 400 Ом·м. На ПК 0.9 наблюдается концентрация загрязнителя верхним углом кирпича, как и в случае пластиковой трубы. Отсюда следует, что отдельные линейные объекты могут предотвращать миграцию нефтепродуктов, и этот эффект уверенно фиксируется геоэлектрическими наблюдениями.

ВЫВОДЫ

На основе выполненного лабораторного эксперимента доказано, что методика электротомографии может успешно применяться для локализации в дисперсных грунтах неизменных нефтепродуктов и мониторинга их миграции. Петрофизическое исследование песчаного грунта с разным содержанием влаги и нефтепродукта показало, что существует характерная зависимость для этих параметров и уровня УЭС, выраженная полиномом третьей степени. Использование покадровой инверсии данных обеспечило создание гладких моделей, четко отражающих последовательное изменение УЭС и позволяющих провести мониторинг геологической среды во времени и пространстве.

Установлено, что при наличии приповерхностных неоднородностей (техногенных помех) предлагаемый подход сохраняет свою информативность, однако возрастает ошибка измерений, и усложняется процесс интерпретации геоэлектрических моделей.

Результаты работ позволяют сделать вывод, что электротомография может дополнить существующие способы контроля нефтяного загрязнения окружающей среды, повысив их общую эффективность за счет оптимизации процесса оконтуривания загрязненных областей. Наряду с этим, необходимо учитывать сложность и неоднородность строения геологической среды в сравнении с ее моделируемым аналогом, а также протекание процессов окисления, биодеградаци и разложения нефтепродуктов, которые неизбежны в реальных условиях.

Данные факты свидетельствуют о необходимости продолжения подобных исследований с использованием разных типов грунтов, изменением минерализации влаги, оценкой степени разложения и т.д. для усовершенствования технологии мониторинга загрязнений методикой электротомографии.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00114 "Геоэлектрическое моделирование многокомпонентных геологических систем".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобачев А.А., Горбунов А.А., Модин И.Н., Шевнин В.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 14–17.
2. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / Ред. В.А. Шевнин, И.Н. Модин. М.: РУССО, 1999. 511 с.
3. Давыдова С.Л., Тарасов В.И. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде: Учеб. пос. М.: Изд-во РУДН, 2004. 163 с.
4. Иовенко Э.Н., Кац М.И., Родионова А.И. Справочник по охране труда и технике безопасности в химической промышленности. Общие положения, устройство и содержание промышленных предприятий / Под ред. В.И. Пряникова. М.: "Химия", 1971. 512 с.
5. Технологии восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. Справочник. М.: РЭ-ФИА, НИА-Природа, 2003. 258 с.
6. Титов К.В., Ильин Ю.Т., Коносовский П.К., Муслимов А.В., Рыбальченко О.В., Орлова О.Г., Мено А. Изменение физических свойств загрязненного нефтепродуктами песка при бактериальном воздействии // Геоэкология. 2012. № 5. С. 455–469.
7. Федосеева Е.Н., Зорин А.Д., Занозина В.Ф., Самсонова Л.Е. Миграция нефтепродуктов из загрязненной почвы в насыпной изолирующий слой чистого песка // Химия в интересах устойчивого развития. 2014. Вып. 22. С. 497–503.
8. Шевнин В.А., Делгадо О., Рыжов А.А. Картирование методом сопротивлений нефтяных загрязнений геологической среды // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С. 27–32.
9. Шевнин В.А., Рыжов А.А., Делгадо-Родригес О. Оценка петрофизических параметров грунтов по данным метода сопротивлений // Геофизика. 2006. № 4. С. 37–43.
10. Электроразведка методом сопротивлений / Отв. ред. В.К. Хмельской, В.А. Шевнин. М.: Изд-во МГУ, 1994. 160 с.
11. Atekwana E.A., Atekwana E.A., Werkema D.D., Duris J.W. et al. In situ apparent conductivity measurements and microbial population distribution at a hydrocarbon-contaminated site // Geophysics. 2004. V. 69. P. 56–63.
12. Atekwana E.A., Atekwana E.A. Geophysical Signatures of Microbial Activity at Hydrocarbon Contaminated Sites: A Review // Surveys in Geophysics. 2010. V. 31. P. 247–283.
13. Chambers J.E., Meldrum P.I., Wilkinson P.B., Ward W. et al. Spatial monitoring of groundwater drawdown and rebound associated with quarry dewatering using automated time-lapse electrical resistivity tomography and distribution guided clustering // Engineering Geology. 2015. V. 193. P. 412–420.
14. Clément R., Descloitres M., Günther T., Oxarango L. et al. Improvement of electrical resistivity tomography for leachate injection monitoring // Waste Management. 2010. V. 30. P. 452–464.
15. De Franco R., Biella G., Tosi L., Teatini P. et al. Monitoring the saltwater intrusion by time lapse electrical resistivity tomography: The Chioggia test site (Venice Lagoon, Italy) // J. of Applied Geophysics. 2009. V. 69. P. 117–130.
16. Genelle F., Sirieix C., Riss J., Naudet V. Monitoring landfill cover by electrical resistivity tomography on an experimental site // Engineering Geology. 2012. V. 145–146. P. 18–29.
17. Ground penetrating radar: Theory and Applications / Editor H.M. Jol. 2009. Oxford. 508 p.

18. Loke M.H., Dahlin T., Rucker D.F. Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity surveys // Near Surface Geophysics. 2014. V. 12. P. 5–24.
19. Mao D., Revil A., Hort R.D., Munakata-Marr J. et al. Resistivity and self-potential tomography applied to groundwater remediation and contaminant plumes: Sandbox and field experiments // J. of Hydrology, 2015. V. 530. P. 1–14.
20. Merritt A.J., Chambers J.E., Wilkinson P.B., West L.J. et al. Measurement and modelling of moisture-electrical resistivity relationship of fine-grained unsaturated soils and electrical anisotropy // J. of Applied Geophysics. 2016. V. 124. P. 155–165.
21. Rosales R.M., Martínez-Pagan P., Faz A., Moreno-Cornejo J. Environmental Monitoring Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) in the Subsoil of Three Former Petrol Stations in SE of Spain // Water Air Soil Pollution. 2012. V. 223. P. 3757–3773.
22. Rucker D.F., Fink J.B., Loke M.H. Environmental monitoring of leaks using time-lapsed long electrode electrical resistivity // J. of Applied Geophysics. 2011. V. 74. P. 242–254.
23. Sauck W.A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments // J. of Applied Geophysics. 2000. V. 44. P. 151–165.
24. Schmutz M., Revil A., Vaudelet P., Batzle M. et al. Influence of oil saturation upon spectral induced polarization of oil-bearing sands // Geophysical Journal International. 2010. V. 183. P. 211–224.
25. Sentenac P., Montinaro A., Kulessa B. Diesel transport monitoring in simulated unconfined aquifers using miniature resistivity arrays // Environmental Earth Science. 2010. V. 61. P. 107–114.
26. Sentenac P., Hogson T., Keenan H., Kulessa B. Small scale monitoring of a bioremediation barrier using miniature electrical resistivity tomography // J. of Applied Geophysics. 2015. V. 115. P. 24–31.
27. Shevnin V., Delgado Rodriguez O., Mousatov A., Flores Hernandez D. et al. Estimation of soil petrophysical parameters from resistivity data: Application to oil-contaminated site characterization // Geofisica Internacional. 2006. V. 45. № 3. P. 179–193.
28. Vaudelet P., Schmutz M., Pessel M., Franceschi M. et al. Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods. A case study in urban context // J. of Applied Geophysics. 2011. V. 75. P. 738–751.
- Shevnin, V.A., Modin, I.N., Moscow, RUSSO, 1999, 511 p. (in Russian).
3. Davydova, S.L., Tarasov, V.I. *Neft' i nefteprodukty v okruzhayushchei srede: Uchebnoe posobie* [Oil and oil products in the environment: Textbook]. Moscow, RUDN, 2004, 163 p. (in Russian).
4. Iovenko, E.N., Kats, M.I., Rodionova, A.I. *Spravochnik po okhrane truda i tekhniki bezopasnosti v khimicheskoi promyshlennosti. Obshchie polozheniya, ustroistvo i sodержanie promyshlennykh predpriyatii* [Handbook to occupational health and safety information in the chemical industry. General provisions, the device and the content industry]. Moscow, Khimiya, 1971, 512 p. (in Russian).
5. *Tekhnologii vosstanovleniya pochv, zagryaznennykh neft'yu i nefteproduktami. Spravochnik*. [Technologies of recovery of oil- and oil-product-polluted soils. Handbook]. Moscow, REFIA, NIA-Priroda, 2003, 258 p. (in Russian).
6. Titov, K.V., Il'in Yu.T., Konosavskii, P.K., Muslimov, A.V., Rybal'chenko, O.V., Orlova, O.G., Meno, A. *Izmenenie fizicheskikh svoystv zagryaznennogo nefteproduktami peska pri bakterial'nom vozdeistvii* [Modifying the physical properties of oil-contaminated sand affected by bacteria]. *Geoekologiya*, 2015, no. 5, pp. 455–469. (in Russian).
7. Fedoseeva, E.N., Zorin, A.D., Zanozina, V.F., Samsonova, L.E. *Migratsiya nefteproduktov iz zagryaznennoi pochvy v nasypnoi izoliruyushchii sloi chistogo peska* [Migration of petroleum products from the contaminated soil in the bulk insulating layer of pure sand]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2014, no. 22, pp. 497–503. (in Russian).
8. Shevnin, V.A., Delgado, O., Ryzhov A.A. *Kartirovanie metodom soprotivlenii neft'yanykh zagryaznenii geologicheskoi sredy* [Mapping of oil contamination in the geological environment by the resistivity method]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2004, no. 5, pp. 27–32. (in Russian).
9. Shevnin, V.A., Ryzhov, A.A., Delgado-Rodriges, O. *Otsenka petrofizicheskikh parametrov gruntov po dannym metoda soprotivlenii* [Assessment of the petrophysical parameters of grounds based on the resistance method]. *Geofizika*, 2006, no. 4, pp. 37–43. (in Russian).
10. Shevnin, V.A., Khmelevskoi, V.K. *Elektrorazvedka metodom soprotivlenii* [Electrical exploration resistivity method]. Moscow, MGU, 1994. p.160. (in Russian).
11. Atekwana, E.A., Atekwana, E.A., Werkema, D.D., Duris, J.W. et al. In situ apparent conductivity measurements and microbial population distribution at a hydrocarbon-contaminated site. *Geophysics*, 2004, vol. 69, pp. 56–63.
12. Atekwana, E.A., Atekwana, E.A. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites: a review. *Surveys in Geophysics*, 2010, vol. 31, pp. 247–283.
13. Chambers J.E., Meldrum P.I., Wilkinson P.B., Ward W., et al. Spatial monitoring of groundwater drawdown and rebound associated with quarry dewatering using automated time-lapse electrical resistivity tomography and distribution guided clustering. *Engineering Geology*, 2015, vol. 193, pp. 412–420.
14. Clément, R., Descloitres, M., Günther, T., Oxarango, L. et al. Improvement of electrical resistivity tomography for

REFERENCES

1. Bobachev, A.A., Gorbunov, A.A., Modin, I.N., Shevnin, V.A. *Elektrotomografiya metodom soprotivlenii i vyzvannoi polarizatsii* [Tomography by the electrical resistivity and induced polarization method]. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki*, 2006, no. 2, pp. 14–17. (in Russian).
2. *Geoekologicheskoe obsledovanie predpriyatii neft'yanoi promyshlennosti* [Geoecological survey of oil companies].

- leachate injection monitoring. *Waste Management*, 2010, vol. 30, pp. 452–464.
15. De Franco, R., Biella, G., Tosi, L., Teatini, P., *et al.* Monitoring the saltwater intrusion by time lapse electrical resistivity tomography: The Chioggia test site (Venice Lagoon, Italy). *J. of Applied Geophysics*, 2009, vol. 69, pp. 117–130.
 16. Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J., Naudet, V. Monitoring landfill cover by electrical resistivity tomography on an experimental site. *Engineering Geology*, 2012, vol. 145–146, pp. 18–29.
 17. Ground penetrating radar: Theory and Applications. H.M. Jol, Ed., 2009, Oxford, 508 p.
 18. Loke, M.H., Dahlin, T., Rucker, D.F. Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3D resistivity surveys. *Near Surface Geophysics*, 2014, vol. 12, pp. 5–24.
 19. Mao, D., Revil, A., Hort, R.D., Munakata-Marr, J., *et al.* Resistivity and self-potential tomography applied to groundwater remediation and contaminant plumes: Sandbox and field experiments // *J. of Hydrology*, 2015. V. 530. P. 1–14.
 20. Merritt, A.J., Chambers, J.E., Wilkinson, P.B., West L.J., *et al.* Measurement and modelling of moisture-electrical resistivity relationship of fine-grained unsaturated soils and electrical anisotropy. *J. of Applied Geophysics*, 2016, vol. 124, pp. 155–165.
 21. Rosales, R.M., Martínez-Pagan, P., Faz, A., Moreno-Cornejo, J. Environmental Monitoring Using Electrical Resistivity Tomography (ERT) in the Subsoil of Three Former Petrol Stations in SE of Spain. *Water Air Soil Pollution*, 2012, vol. 223, pp. 3757–3773.
 22. Rucker, D.F., Fink, J.B., Loke, M.H. Environmental monitoring of leaks using time-lapsed long electrode electrical resistivity. *J. of Applied Geophysics*, 2011, vol. 74, pp. 242–254.
 23. Sauck, W.A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *J. of Applied Geophysics*, 2000, vol. 44, pp. 151–165.
 24. Schmutz, M., Revil, A., Vaudelet, P., Batzle, M., *et al.* Influence of oil saturation upon spectral induced polarization of oil-bearing sands. *Geophysical Journal International*, 2010, vol. 183, pp. 211–224.
 25. Sentenac, P., Montinaro, A., Kulesa, B. Diesel transport monitoring in simulated unconfined aquifers using miniature resistivity arrays. *Environmental Earth Science*, 2010, vol. 61, pp. 107–114.
 26. Sentenac, P., Hogson, T., Keenan, H., Kulesa, B. Small scale monitoring of a bioremediation barrier using miniature electrical resistivity tomography. *J. of Applied Geophysics*, 2015, vol. 115, pp. 24–31.
 27. Shevnin, V., Delgado Rodriguez, O., Mousatov, A., Flores Hernandez, D., *et al.* Estimation of soil petrophysical parameters from resistivity data: Application to oil-contaminated site characterization. *Geofisica Internacional*, 2006, vol. 45, no. 3, pp. 179–193.
 28. Vaudelet P., Schmutz M., Pessel M., Franceschi M. *et al.* Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods. A case study in urban context. *J. of Applied Geophysics*, 2011, vol. 75, pp. 738–751.

MONITORING OF OIL PRODUCT MIGRATION IN THE LABORATORY USING ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

P. A. Ryazantsev^{1,2}, M. V. Nilova¹, D. M. Belokhvosik²

¹*Institute of Geology, Karelian Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, ul. Pushkinskaya 11, Petrozavodsk, 185910 Russia. E-mail: chthonian@yandex.ru*

²*Department of Geology and Geophysics, Petrozavodsk State University, pr. Lenina 33, Petrozavodsk, 185910 Russia.*

The results of a laboratory experiment on the possible use of electrical resistivity tomography (ERT) for the study of oil product migration in the disperse ground are reported. The experiment was performed in a model cell representing a plastic tank dimensions 2000x700x600 mm. The cell was filled with fine, homogenous sand, which laid sloping clay layer (angle 20°). Waste oil was used as a pollutant. In the first stage of the work, we investigated the relationship between the indicators of the electrical resistivity and the content of pollutant to the fine sand at change of humidity of 15 to 30%. It was found that the resistivity increases with the increasing the percentage of oil in the sand. This relationship is obviously not linear (a polynomial trend line was constructed in the article). This is due to the processes of water and oil distribution in the pore space of sand, which causes a change of electric current direction. The data acquisition was made through electrical resistivity tomography (ERT) method with a day measurement interval. Four models were obtained, which show the distribution of the environment resistivity every 24 hours. Measurements were carried out using the equipment SKALA-48M with Schlumberger survey array by step of 50 mm along profile. The data sheet were processed using the time-lapse inversion. The simulation showed that the redeposition of oil is reliably registered by the resistivity characteristics. In addition, we investigated the influence of anthropogenic noise generated by local objects (pipe, metal, brick), on the information obtained from ERT geoelectric models. It was shown that these objects operate as are a sort of "collectors" for petroleum products and can increase their concentration in the environment. Proceeding from the laboratory experiment results, the possibility of using ERT for localizing the areas contaminated by oil products, and conducting monitoring studies at the geo-ecological research was demonstrated.

Key words: ERT, pollution, oil product, geoelectrical model, electrical resistivity, migration, cell laboratory, monitoring.