

УДК 550.837.82:622.692.24

*В. Н. Даниленко, К. С. Епископосов, А. А. Сергеев*  
АО НПП «ВНИИГИС»

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЗОНДИРОВАНИЙ СТАНОВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ (ЗСБ) НА ОБЪЕКТАХ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ ГАЗА**

Рассмотрены задачи, решаемые наземным методом зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне (ЗСБ) на объектах подземных хранилищ газа (ПХГ), и способы решения этих задач. Показана эффективность метода в различных горно-геологических условиях, в том числе реализация метода в стационарном мониторинговом режиме.

*Ключевые слова:* подземное хранилище газа, покрывка, герметичность по латерали, зондирование становлением поля, режимы эксплуатации, мониторинг.

Эксплуатация подземных хранилищ газа (ПХГ) связана с периодами закачки, хранения и откачки газа. Во время закачки и хранения возможны утечки из объекта хранения газа. Поэтому эксплуатация ПХГ регламентирована мероприятиями по их безопасному использованию, обеспечению охраны недр и окружающей природной среды. В состав этих мероприятий входит контроль герметичности покрывки, межколонных и заколонных газопроявлений и геохимический контроль загазованности и загрязнения нефтепродуктами приповерхностных отложений.

Глубинным методом, способным зафиксировать участки вторичного газонакопления как прямого свидетельства нарушения герметичности ПХГ в условиях наличия многочисленных искусственных проводников (оборудование скважин, трубы, кабели и др.), является геофизический метод наземной импульсной индуктивной электро-разведки – зондирование становлением электромагнитного поля в ближней зоне (ЗСБ). Высокая производительность и относительная малозатратность метода делает возможным его применение в мониторинговом режиме. Комплексование ЗСБ с другими методами (межскважинной сейсмотомографией, электропрофилеированием, вертикальным электрическим зондированием) позволяет уточнять геологический разрез надпродуктивной толщи, что важно для про-

гнозирования возможности формирования зон вторичного газонакопления (ЗВГ), детализировать полученные результаты и при благоприятных обстоятельствах оконтуривать ЗВГ в пространстве. Метод ЗСБ в комплексе с другими геофизическими методами был успешно применен компанией АО НПФ «ГИТАС» на нескольких ПХГ европейской части России, а также в Белоруссии [1].

В методе ЗСБ изучается нестационарное электромагнитное поле, индуктивно возбуждаемое с помощью незаземленного контура [4, 5]. При пропускании кратковременного импульса тока через такой контур в окружающем его пространстве возникает первичное магнитное поле. Возникшее переменное магнитное поле индуцирует в проводящих областях разреза нестационарные электрические токи, существующие и после окончания импульса тока в источнике первичного поля. Зависимость скорости затухания токов, наведенных в различных геологических объектах, от их проводимости и размеров позволяет разделить во времени влияние различных элементов геоэлектрического разреза на регистрируемое поле. Измерения проводятся согласно инструкции [3].

ПХГ создаются, как правило, на базе истощенных газовых месторождений, образование и существование которых в течение геологического времени предполагает наличие надежной покрывки, исключающей утечку газа в вышележащие горизонты. Она может быть нарушена в результате техногенных воздействий вследствие бурения скважин, которые являются каналом поступления газа из рабочего пласта-коллектора в вышележащие горизонты. Цементный камень скважины подвергается циклическим репрессивно-депрессивным воздействиям, что способствует его разрушению и заколонному перетоку газа с последующим его распространением по пластам-коллекторам надпродуктивной толщи и формированием зон вторичного скопления газа. При этом вследствие вытеснения газом пластовой воды могут формироваться также зоны вторичного обводнения (ЗВО).

Физической основой для выделения ЗВГ по данным ЗСБ является увеличение удельного сопротивления пласта, а для выделения ЗВО – уменьшение удельного сопротивления пласта по сравнению с «фоновыми» значениями.

Для описания зависимости удельного сопротивления пласта от коэффициента газонасыщения  $k_r$  обычно применяется формула [2]:

$$1 - k_r = n \sqrt{\frac{\rho_{\text{вп}}}{\rho_{\text{п}}}},$$

где  $\rho_{\text{вп}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$  – соответственно удельные сопротивления полностью водонасыщенного пласта и газонасыщенного с коэффициентом  $k_r$  пласта;  $n$  – коэффициент, определяющийся свойствами пласта (для гидрофильных коллекторов  $n \approx 2$ , для гидрофобных  $n > 2$ ).

Отсюда

$$\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{вп}}} = \frac{1}{(1 - k_r)^n}.$$

Например, для гидрофильных коллекторов при  $k_r = 0,9$  получим

$\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{вп}}} = 100$ , то есть при замещении воды газом с коэффициентом газонасыщения 0,9 удельное сопротивление пласта возрастет в 100 раз.

Экспериментальным доказательством высокой эффективности ЗСБ для оценки текущей газонасыщенности и выделения ЗВГ являются результаты, полученные на ПХГ1. На исследовавшемся участке этого ПХГ образовался грифон, вызванный поисковой скважиной, ликвидированной с нарушением технологии в начале 1950-х годов. В связи с образованием грифона была пробурена специальная разгрузочная скважина. Совместно с геологической службой ПХГ был выполнен эксперимент, заключавшийся в проведении измерений по методу ЗСБ в окрестности разгрузочной скважины при ее работе и повторении этих измерений после герметизации скважины в течение суток. Давление в скважине при этом выросло всего на 0,1 атм, что свидетельствует о фильтрации газа в окрестности скважины.

На рис. 1 приведено сопоставление удельных сопротивлений, полученных методом ЗСБ при работе скважины и после ее герметизации. Как видно из полученных результатов, герметизация скважины привела к выраженному увеличению сопротивлений в интервалах глубин, отвечающих по данным ГИС пластам-коллекторам.

На ПХГ2 исследования ЗСБ были проведены с целью прогноза интервалов глубин залегания поглощающих пластов известняков и степени поглощения бурового раствора (БР) в процессе бурения скважин. Поглощение БР происходит из-за наличия пор, каналов, трещин, пустот в проходимых скважиной породах и (или) недостаточной устойчивости (сопротивляемости) пород к давлению столба

жидкости в скважине. В результате возникает гидроразрыв пород, и в образовавшиеся трещины проникает скважинная жидкость; необходимым же фактором поглощения БР является превышение гидростатического давления над пластовым, то есть присутствует anomalно низкое пластовое давление (АНПД).

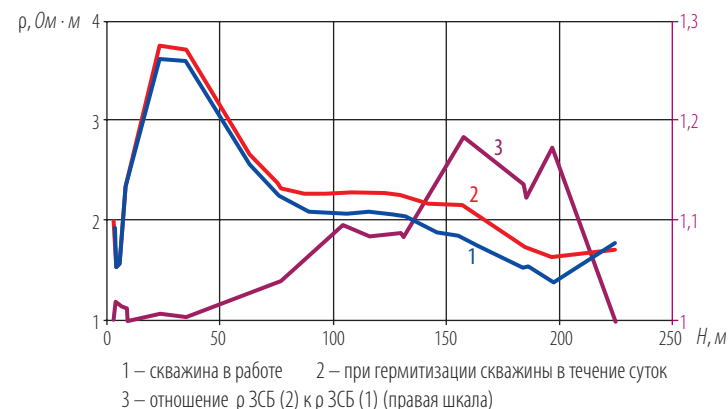


Рис. 1. Значения удельных сопротивлений ЗСБ по данным измерений в окрестности разгрузочной скважины при ее работе и после ее герметизации в течение суток

Эффективное применение ЗСБ обеспечивается значительным изменением электрических параметров в интервале поглощения. Глубокие отрицательные аномалии на диаграммах удельных электрических сопротивлений (УЭС) и потенциала самопроизвольной поляризации (ПС) стандартного комплекса, наблюдаемые по скважине 144 (рис. 2), фиксируют интервалы полного поглощения БР и дают основание для возможности прогнозирования поглощения БР по результатам электроразведочных исследований.

Прогнозирование возможности поглощения БР осуществлялось по следующему алгоритму. Для всего исследованного участка при временах задержки  $t_i$ , отвечающих интервалу залегания потенциально опасных мячковских известняков, рассчитывались значения нормированных ЭДС  ${}_N E_{n_{25}} = E_N / E_{25}$ , где  $E_{25}$  – значения ЭДС, зафиксированные около аварийной скважины 144, а  $E_N$  – зафиксированные на N-й физической точке. Высокие значения  ${}_N E_{n_{25}}$ , превосходящие

величину 0,75, рассматривались как сигнализирующие о возможности частичного поглощения бурового раствора (ЧПБР). Аномально высокие значения  ${}_N E_{n_{25}}$ , превосходящие величину 0,9, рассматривались как сигнализирующие о возможности полного поглощения бурового раствора (ППБР).

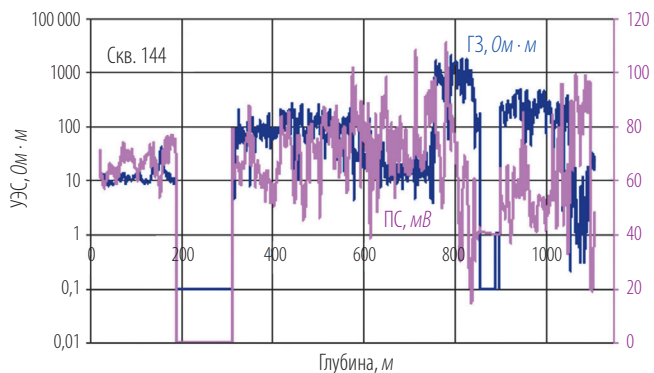


Рис. 2. Треки УЭС и ПС по скважине 144

На рис. 3 показан трек нормированной ЭДС точки 9, расположенной около скважины 4. В интервале залегания отложений мячковских известняков (глубина кровли 229 м) значения относительного параметра  ${}_9 E_{n_{25}}$  колеблются около величины 0,8. По результатам анализа трека  ${}_9 E_{n_{25}}$  сделан прогноз возможного ЧПБР.

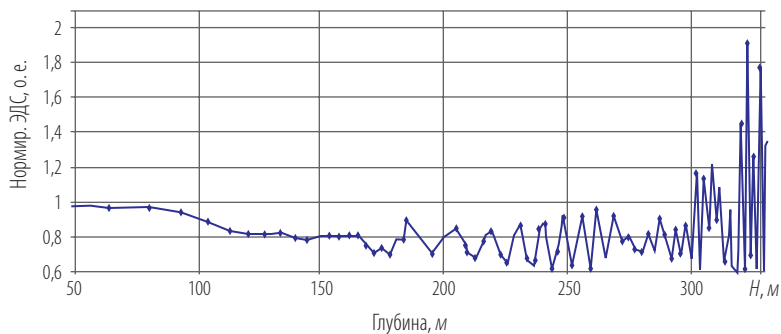


Рис. 3. Трек нормированной ЭДС  ${}_9 E_{n_{25}}$  точки 9, расположенной вокруг скважины 4

На рис. 4 показан трек нормированной ЭДС точки 22, расположенной около скважины 7. В интервале залегания мячковских отложений (глубина кровли 258 м) значения относительного параметра  ${}_{22} E_{n_{25}}$  колеблются около величины 0,6. По результатам анализа трека  ${}_{22} E_{n_{25}}$  сделан прогноз малой вероятности ПБР.

На ПХГЗ исследования ЗСБ в комплексе с методом ВЭЗ были проведены с целью уточнения положения газодляного контакта (ГВК), герметичности хранилища по латерали в краевых зонах хадумского горизонта на северном участке ПХГ. Была произведена площадная съемка указанными методами. В результате проведенных работ выполнено детальное расчленение верхней части разреза, определены области распространения горизонтов с повышенным УЭС по нескольким срезам глубин. В процессе интерпретации данных электроразведки была выполнена их калибровка на основании данных ГИС, имеющих на площади работ скважин. Затем уже по полученным закономерностям данные электроразведки были распространены на весь участок. Таким образом, опираясь на промысловые и промыслово-геофизические данные, на участке работ методом ЗСБ определено распространение газонасыщенных коллекторов в верхней части разреза. По результатам интерпретации полученных данных был сделан вывод о том, что контур ГВК по кровле коллекторов хадумского горизонта на северном участке ПХГ не выходит за пределы принятого контура. Это позволило сделать вывод о герметичности газохранилища по латерали в данной части структуры.

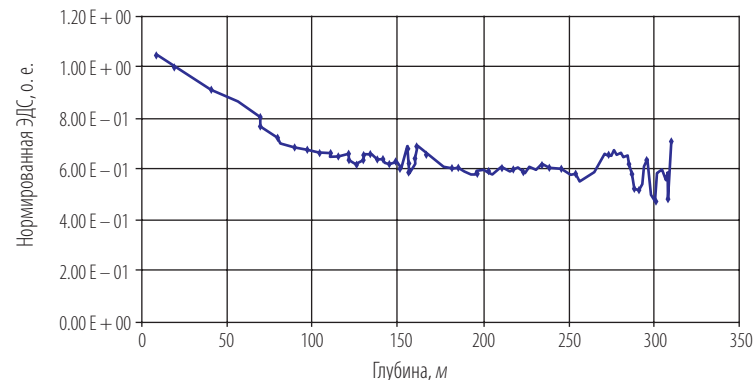


Рис. 4. Трек нормированной ЭДС  ${}_{22} E_{n_{25}}$  точки 22

На ПХГ4 метод ЗСБ был использован с целью мониторинга изменения газонасыщенности объекта хранения газа и верхней части разреза. Возможность неконтролируемых утечек газа в приповерхностные отложения и связанное с этим создание взрывоопасной ситуации требуют постоянного контроля над изменением газонасыщенности горизонтов. Обладая высокой чувствительностью и разрешающей способностью, метод ЗСБ позволяет производить мониторинг как в местах заложения скважин, так и вне таких зон. На ПХГ4 был реализован стационарный комплекс с ежедневной регистрацией процесса становления поля методом ЗСБ и передачей данных на стационарный компьютер, находящийся на территории ПХГ. Имелась также возможность передачи информации на удаленный компьютер оператора.

В процессе зондирования была использована установка, состоящая из незаземленных генераторной и приемной петель, расположенных на глубине 30 см от поверхности земли. Процесс возбуждения поля в исследуемой среде вызывался включением–выключением тока в генераторной петле. Это поле вызывает в приемной петле ЭДС, которую называют «переходной характеристикой среды» или «сигналом становления поля». В результатах измерений содержатся сведения об исследуемой среде, характеристики которой затем определяются в процессе интерпретации.

Установка работает в автономном режиме, используя энергию аккумуляторной батареи. Циклом работы установки управляет мини-коммуникатор. По сигналу от него устройство управления подает напряжение питания на аппаратуру. Мини-коммуникатор посылает команду аппаратуре провести цикл измерений. По окончании цикла измерений мини-коммуникатор считывает и передает результаты на удаленный компьютер, затем отключает питание аппаратуры. Емкость батареи питания восполняется солнечным модулем.

При мониторинговых ежедневных измерениях на стационарной установке можно наблюдать качественные изменения процесса становления электромагнитного поля очередных замеров, изменения конечных вычисляемых электрических параметров – суммарной продольной проводимости, удельного электрического сопротивления  $\rho$  на соответствующих глубинах. Устойчивое увеличение  $\rho$  на глубинах, соответствующих объекту хранения газа или вышележащих горизонтов, означает изменение газонасыщенности в большую сторону.

На ПХГ5 исследования ЗСБ выполнены для оценки газонасыщенности контрольных горизонтов, залегающих над объектом хранения газа, и их геоэлектрического расчленения. В результате площадных исследований была построена геоэлектрическая модель верхней части разреза района работ (рис. 5), отражающая геологическое строение и плано-высотное размещение высокоомных зон как положение возможных путей миграции и мест разгрузки газа. На рисунке такие зоны обозначены желтым цветом.

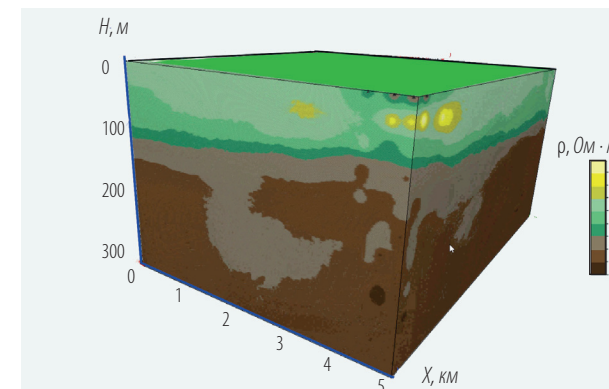


Рис. 5. Модель геоэлектрического строения верхней части разреза

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гулимов А. В., Епископосов К. С., Даниленко В. Н. Контроль герметичности подземных хранилищ газа методом зондирования становлением электромагнитного поля в ближней зоне // «Санкт-Петербург-2010. К новым открытиям через интеграцию геонаук»: IV Международная научно-практическая конференция и выставка, Санкт-Петербург, 5–8 апреля 2010 г.
2. Дахнов В. Н. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра, 1982.
3. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984.
4. Сидоров В. А. Импульсная индуктивная электроразведка. М.: Недра, 1985.
5. Электроразведка: Справочник геофизика. М.: Недра, 1979.

Рецензент доктор геол.-минер. наук, проф. П. Ю. Пушкарев