

УДК 550. 8.621. 039.9(24)

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИКИ ОБВОДНЕНИЯ ГРУНТОВ В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ (НА ПРИМЕРЕ ВВР-К ИЯФ)

Шульга М.В., Жолдыбаев А.К., Кушербаева Н.Н.

Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан

Приведены результаты аналитического и экспериментального изучения геоэлектрических и деформационных свойств песчано-глинистых грунтов с применением электроразведки методом вызванной поляризации, улучшенной за счет исключения влияния электрического сопротивления грунтов, на примере района расположения реактора ВВР-К, ИЯФ. Полученные данные могут быть использованы при инженерно-геологическом мониторинге безопасности потенциально опасных объектов в подобных геологических условиях.

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой составляющей обеспечения безопасности эксплуатации объектов атомной отрасли является мониторинг инженерно-геологических условий их размещения [1], в частности – наблюдения деформационных свойств грунтов в основании производственных зданий. Как показала практика [2, 3], наибольшие изменения этих свойств, особенно в глинистых грунтах, происходят при их обводнении и изменении режима этого процесса во времени.

Для изучения изменения и прогнозирования обводненности грунтов кроме традиционных инженерно-геологических технологий привлекаются и геофизические методы, в том числе и электроразведка методом сопротивлений [4]. При этом решаются задачи по расчленению пород по составу, дисперсности и влажности в параметрах кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) и поляризуемости (η_k). Физической основой решения этих задач, как показано в [5], является снижение электрического сопротивления и повышение поляризуемости в обводнённых песчано-глинистых грунтах.

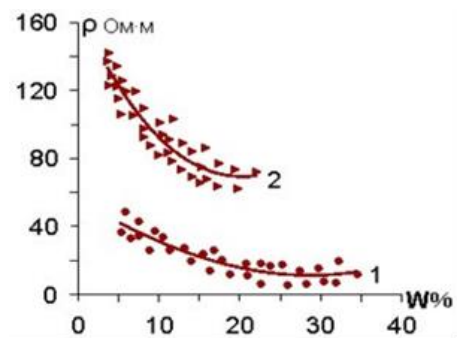
Целевым назначением работы ставилась оценка информационных возможностей электроразведки в параметрах электрического сопротивления и поляризуемости для выявления и мониторинга изменений обводненности грунтов в местах расположения объектов атомной отрасли. В состав работ для выполнения целевого задания входили информационно-аналитические исследования по обоснованию способов решения поставленной задачи и их апробация полевыми съёмками на территории, прилегающей к реактору ВВР-К. Результаты этих работ являются предметом рассмотрения в настоящем докладе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

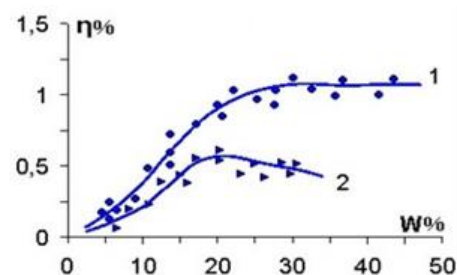
Информационную основу для изучения возможности повышения достоверности данных электроразведки при изучении обводненности и особенностей строения песчано-глинистых разрезов составили результаты анализа их геоэлектрических и деформационных свойств, прочностных свойств, а также данные полевых электроразведочных съёмок.

Результаты анализа геоэлектрических свойств песчано-глинистых грунтов

Зависимости электрического сопротивления и поляризуемости различных типов песчано-глинистых грунтов от влажности детально изучены в работе [6]. На основе данных измерений по пробам, взятым из шурфов, показано наличие однозначного снижения электрического сопротивления (рисунок 1, а) по мере повышения влажности образцов грунтов.



а) удельное электрическое сопротивление суглинков (1) и песков (2)



б) поляризуемость суглинков (1) и песков (2)

Рисунок 1. Зависимость геоэлектрических свойств песчано-глинистых грунтов от относительной влажности по литературным данным [6]

При этом максимальные градиенты понижения электрического сопротивления ($\sim 40\text{--}70$ Ом·м) вполне закономерно получены в песках, электропроводность которых, главным образом, определяется объемом воды в поровом пространстве. Тогда как в суглинках, изначально имеющих повышенную ионную

проводимость, снижение электрического сопротивления за счёт обводненности проявлено в меньшей степени (~40–15 Ом×м), чем в песках.

Несколько иное изменение поляризуемости установлено при повышении влажности этих грунтов (рисунок 1, б). В интервале изменения влажности от 2 до 15 % различия в этом параметре в суглинках и песках практически нет. При изменении влажности от 15 до 20 %, поляризуемость этих грунтов возрастает практически с прежними градиентами. Далее, по мере увеличения влажности до 35 % и более, для суглинков имеет место резкое снижение приращения поляризуемости, тогда как в песках значения этого параметра имеют тенденцию к снижению.

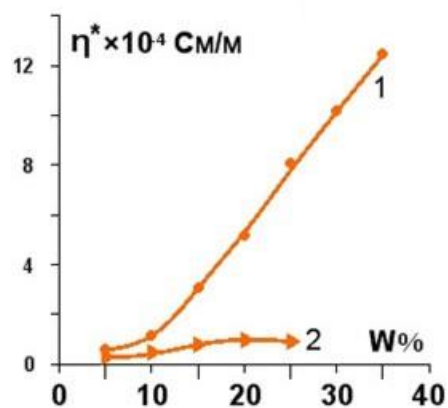
Однако, экспериментально установлено [6, 7], что гораздо в большей степени электрическое сопротивление и поляризуемость грунтов зависят от минерализации воды. В этой ситуации, очевидно, что данные электроразведки по расчленению разреза и оценке его обводненности будут носить лишь вероятностный характер, пока не будет методических инструментов для исключения влияния минерализации воды.

И если учёт влияния минерализации в электрическом сопротивлении практически невозможен, то в поляризуемости решение этой задачи может быть получено на основе привлечения параметра относительной поляризуемости η^* . В работе [7] показано, что для зернистых ионопроводящих пород справедливо соотношение $\eta^* \approx \eta/\rho$, где: η – поляризуемость, ρ – удельное электрическое сопротивление.

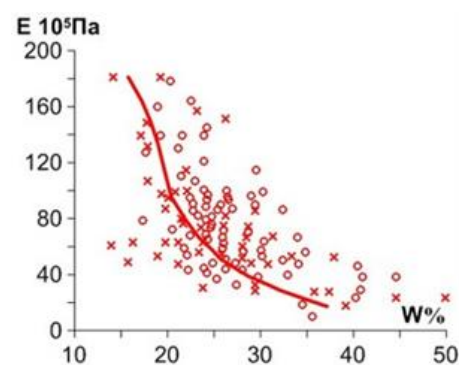
Для проверки этого положения выполнены расчеты относительной поляризуемости для суглинков и песков по данным, приведённым на рисунке 1. Результаты этих расчётов (рисунок 2, а) свидетельствуют, о том, что в параметре относительной поляризуемости суглинки и пески устойчиво различаются при значениях влажности более 10% (естественная влажность).

При этом дальнейшее увеличение влажности отражается практически линейным нарастанием относительной поляризуемости суглинков, тогда как для песков значения этого параметра изменяются несущественно.

На рисунке 2, б приведены данные [8], свидетельствующие о закономерном снижении значений модуля деформации глинистых грунтов по мере увеличения их влажности. При установлении корреляционной связи между этим параметром и поляризуемостью в зависимости от влажности, очевидна принципиальная возможность привлечения последнего не только для оценки динамики обводненности глинистых грунтов, но и для их упруго-деформационных свойств.



а) относительная поляризуемость суглинков (1) и песков (2)



б) модуль деформации глинистых и пылеватых грунтов

Рисунок 2. Зависимость относительной поляризуемости и модуля деформации песчано-глинистых грунтов от относительной влажности [8]

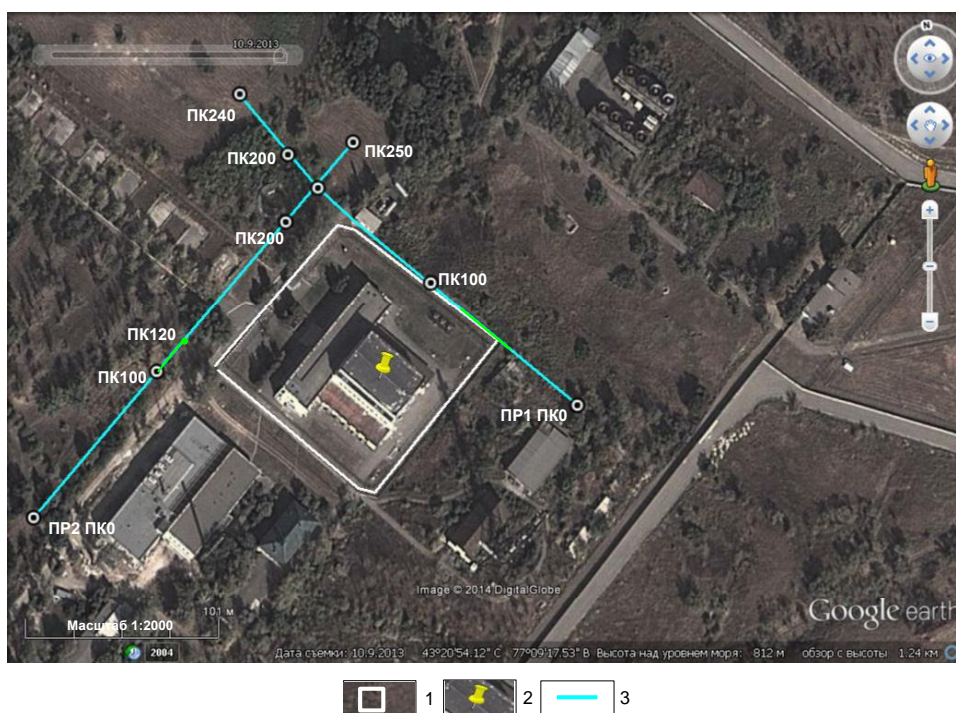
Методика и примеры результатов электроразведочных съемок при оценке динамики обводнения грунтов

Полевые наблюдения включали электроразведочную съёмку методом дипольного электрического зондирования с регистрацией вызванной поляризации (ДЭЗ-ВП) на площадке, прилегающей к реактору ВВР-К (рисунок 3), выполненную в сентябре 2016 и июне 2017 года.

Электроразведочные съёмки выполнялись 8-канальной установкой, приведённой на рисунке 4.

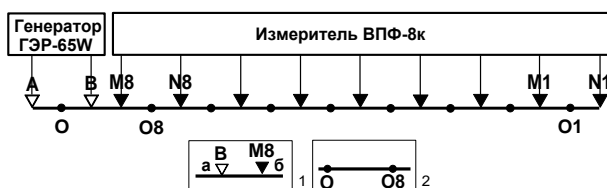
Измерения электрического сопротивления и поляризуемости проведены с использованием генератора ГЭР-65W-500V и измерителя ВПФ-210-8к (разработка РГП ИГИ-2015) с шагом 10 м. Погрешность измерений электрического сопротивления была не хуже $\pm 0.1\%$, поляризуемости – $\pm 0.02^\circ$. По данным измерений построены геоэлектрические разрезы в параметрах электрического сопротивления ρ_k и поляризуемости фвп.

По профилю 1, как показано на рисунке 5, разрез характеризуется блоковым строением.



1 – контур площадки реактора; 2 – здание реактора; 3 – профили электроразведочной съёмки

Рисунок 3. Площадка реактора ВВР-К ИЯФ. Система полевых электроразведочных съёмок в 2016-2017 годах



1 – точки заземления питающих (а) и приёмных (б) электродов;
2 – расстояние между центрами пар питающих и приёмных электродов

Рисунок 4. Схема электроразведочной установки для наблюдений методом дипольного зондирования (ДЭЗ)

В 2016 году (рисунок 5 а, б) фланговые части (ПК 15–70 и ПК 190–240), где уровень грунтовых вод согласно [9] расположен на глубине порядка 40–45 м, характеризуются на глубину до 45 м повышенными значениями электрического сопротивления, пониженной поляризуемостью. По совокупности этих признаков и с учётом данных [6, 10] разрез фланговых частей проинтерпретирован как сложенный преимущественно песчано-гравийно-галечными грунтами в условиях естественной влажности. Центральная часть профиля 1 характеризуется в целом повышенной электропроводностью. Характерной его особенностью является аномально повышенная поляризуемость в интервале ПК 145–175. Также согласно [6, 10] полученные данные характеризуют в разрезе как слабо проницаемые суглинистые грунты.

По данным измерений 2017 года в блоковой структуре разреза по этому же профилю в параметре

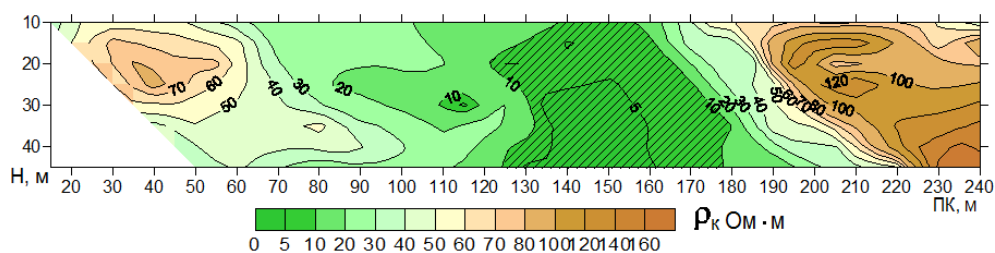
электрического сопротивления, как показано на рисунке 5, в, наибольшие изменения отмечены в центральной части (ПК 120–190). Электропроводящая зона с сопротивлением ρ_k менее $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ приобрела четкую линейную форму с падением в северном направлении и горизонтальной мощностью порядка 20 м.

Произошли изменения значений электрического сопротивления в сторону его уменьшения и на фланговых участках профиля. В интервале профиля ПК 15–70 максимальные значения этого параметра снизились с 80 до 50 $\text{Ом}\cdot\text{м}$, а в интервале ПК 190–240 – с 160 до 120 $\text{Ом}\cdot\text{м}$. Конфигурация областей повышенных значений электрического сопротивления практически не изменилась.

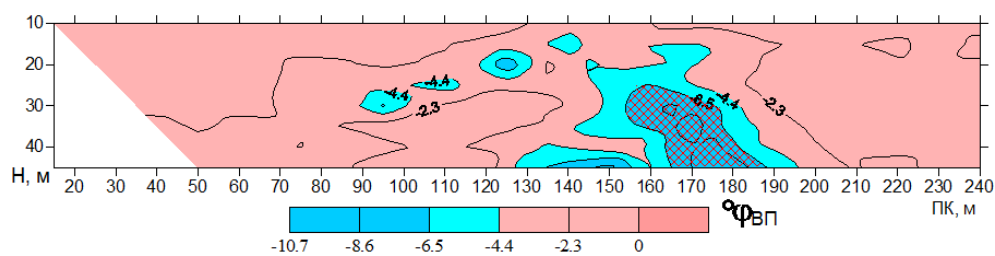
В параметре поляризуемости, в соответствии с рисунком 5 г, наибольшие изменения также произошли в центральной части профиля. Если в 2016 г. зона с максимальной поляризуемостью картировалась на глубинах более 25 м, то в 2017 г. она существенно приблизилась к дневной поверхности и представлена, также как по данным ρ_k , линейно вытянутой структурой.

Принимая во внимание, что измерения 2016 года проводились в относительно сухой период, а 2017 года – в начале лета, в период большей остаточной весенней увлажнённости изучаемого разреза, предположено, наблюдаемые эффекты, наиболее вероятно связаны с динамикой обводнённости песчано-глинистых грунтов.

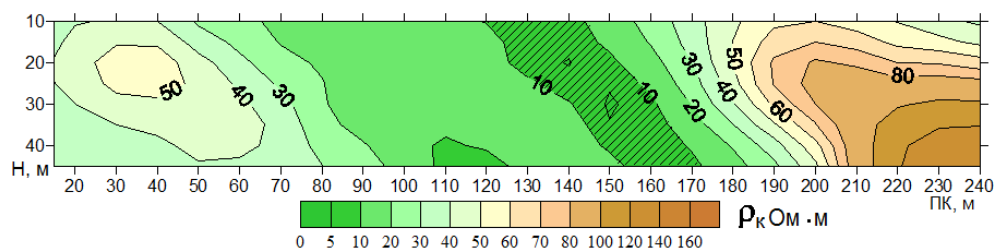
**ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПРИ ОЦЕНКЕ ДИНАМИКИ ОБВОДНЕНИЯ ГРУНТОВ В МЕСТАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ (НА ПРИМЕРЕ ВВР-К ИЯФ)**



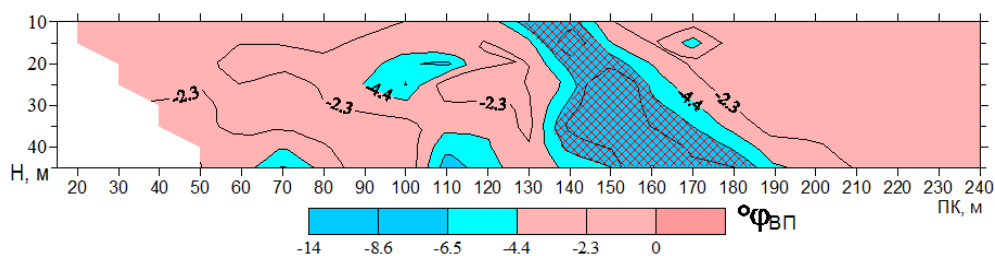
а) геоэлектрический разрез в параметре электрического сопротивления ρ_k (сентябрь 2016 г.)



б) геоэлектрический разрез в параметре поляризуемости $\phi_{ВП}$ (сентябрь 2016 г.)



в) геоэлектрический разрез в параметре электрического сопротивления ρ_k (июнь 2017 г.)



г) геоэлектрический разрез в параметре поляризуемости $\phi_{ВП}$ (июнь 2017 г.)



- 1 – изолинии кажущегося сопротивления ρ_k , области пониженных (а) и повышенных (б) значений этого параметра;
 2 – электропроводящие зоны по данным съёмок 2016 и 2017 г.г.; 3 – изолинии поляризуемости $\phi_{ВП}$, области фоновых (а) и anomalно повышенных более стандартного отклонения от среднего (б) значений этого параметра;
 4 – зоны anomalно повышенной поляризации по данным съёмок 2016 и 2017 г.г.

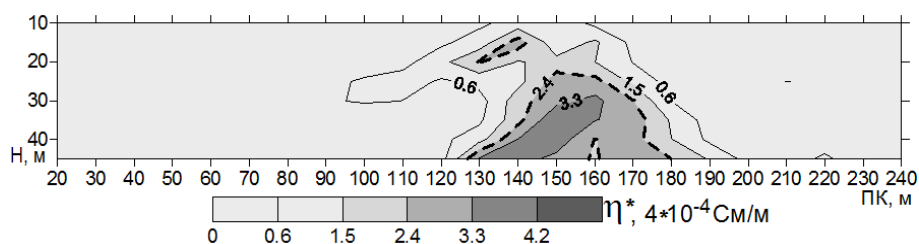
Рисунок 5. Площадка реактора ВВР-К ИЯФ, профиль 1. Геоэлектрические разрезы в параметрах электрического сопротивления ρ_k и поляризуемости $\phi_{ВП}$ по данным съёмок 2016 и 2017 годов

Более контрастно, за счет исключения влияния электрического сопротивления на эффекты вызванной поляризации, проявлена динамика обводненности суглинистой части разреза в параметре относительной поляризуемости (рисунок 6).

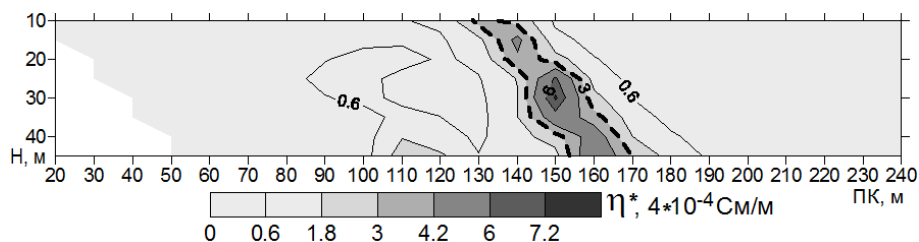
Как следует из полученных данных, осенью 2016 года (рисунок 6, а) глубина залегания наиболее увлажненных суглинков составляла порядка 22 метров и область увлажнения представляла собой куполообразную структуру. Увлажнение на меньших глу-

бинах проявлено фрагментарно в интервале ПК 125–140.

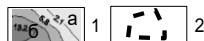
В 2017 году структура суглинистой части разреза в параметре относительной поляризации практически идентична разрезам ρ_k и $\phi_{ВП}$. Судя по изолиниям максимальных значений параметра η^* в 2016 и 2017 гг. (13,2 и 21,5 у.е. соответственно), полагается, что измерениями 2017 года с высокой степенью вероятности установлена повышенная обводненность суглинистой части разреза в период измерений.



а) геоэлектрический разрез в параметре относительной поляризуемости η^*
(съёмка сентябрь 2016 г.)



б) геоэлектрический разрез в параметре относительной поляризуемости η^*
(съёмка июнь 2017 г.)



1 – изолинии относительной поляризуемости, области, фоновых (а) и anomalно повышенных более стандартного отклонения от среднего (б) значений этого параметра; 2 – контуры локальной суглинистой неоднородности в песчано-гравийном грунте

Рисунок 6. Площадка реактора ВВР-К ИЯФ, профиль 1. Геоэлектрические разрезы в параметре относительной поляризуемости η^* по данным режимных съёмок

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью оценки информационных возможностей электроразведки в параметрах электрического сопротивления и поляризуемости для выявления и мониторинга изменений обводненности грунтов в местах расположения объектов атомной отрасли выполнен по литературным данным анализ геоэлектрических свойств песчано-глинистых грунтов и связи их с модулем деформации. Проведены полевые съёмки по апробации методических приемов измерений и обработки электроразведочных данных.

Получены следующие основные результаты:

1. Установлено наличие реальных предпосылок для оценки обводненности песчано-глинистых грунтов в параметрах электрического сопротивления и поляризуемости. Определен способ повышения достоверности данных электроразведки методом вы-

званной поляризации на основе исключения влияния электрического сопротивления за счет привлечения параметра относительной поляризации.

2. Показана взаимосвязь параметра относительной поляризации с модулем деформации. При установлении корреляционной зависимости между этими параметрами представляется возможным прогнозирование изменения несущих свойств грунтов по данным электроразведки.

3. По данным полевых электроразведочных наблюдений методом ДЭЗ-ВП получены сведения по динамике обводненности суглинистых грунтов в районе расположения реактора ВВР-К, чем подтверждена эффективность метода для выявления и мониторинга изменений обводненности песчано-глинистых грунтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 ноября 2006 г. № 5 Об утверждении и введении в действие руководства по безопасности «Мониторинг инженерно-геологических условий размещения объектов ядерного топливного цикла». Утверждено и введено в действие с 1 марта 2007 г. Руководство по безопасности «Мониторинг инженерно-геологических условий размещения объектов ядерного топливного цикла» (РБ 036-06).
2. Барац, Н.И. Механика грунтов: Учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. – 106 с.
3. Рекомендации по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении/ПНИИИС. — М.: Стройиздат, 1984. – 156 с.
4. ПНИИИС Госстроя СССР. Рекомендации по геофизическим работам при инженерных изысканиях для строительства (электроразведка). Москва СТРОЙИЗДАТ 1984.
5. Жданов, М.С. Электроразведка. Учебник для вузов. – М.: Недра.1986. – 316 с.

6. Шарапанов, Н.Н. Методика геофизических исследований при гидрогеологических съёмках с целью мелиорации земель. / Н.Н. Шарапанов, Г.Я.Черняк, В.А. Барон // Недра, 1974. – 176 с.
7. Комаров, В.А. О природе электрических полей вызванной поляризации и возможностях их использования при поисках рудных месторождений / В.А. Комаров // Вестник Ленинградского гос. ун-та. Сер. геол и геогр. 1957. – №16, – С. 37–46.
8. Рекомендации по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении/ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 156 с.
9. Оценка фактической сейсмостойкости строительных конструкций здания реактора ВВР-К ИЯФ: отчёт о НИР (промежуточный): Институт геофизических исследований (РГП ИГИ); рук. Михайлова Н.Н.; исполн.: Шайторов В.Н. [и др.]. - Курчатова 2014. – 28 с.
10. Рыжов, А.А Петрофизический подход к данным малоглубинной электроразведки / А.А. Рыжов (ВСЕГИНГЕО), В.А. Шевнин, Д.А. Квон (МГУ, Геологический ф-т) // Инженерная, угольная и рудная геофизика. – 2015. Современное состояние и перспективы развития. Сочи, 28.09–02.10.2015.

**АТОМ САЛАСЫ ОБЪЕКТІЛЕРІ ОРНАЛАСҚАН ЖЕРЛЕРДЕ ГРУНТТАР СУЛАНУ ДИНАМИКАСЫН
БАҒАЛАУ КЕЗІНДЕГІ ЭЛЕКТРБАРЛАУ (ЯФИ ССР-Қ ҮЛГІСІНДЕ)**

М.В. Шульга, А.К. Жолдыбаев, Н.Н. Кушербаева

Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатова, Қазақстан

ЯФИ ССР-Қ реакторы орналасқан аудандағы үлгісінде грунттардың электр кедергісінің әсерін жою есебінен жақсартылған, өндірілген поляризация әдісімен электрбарлауы қолданып құм-саз грунттардың геоэлектрикалық және деформациялық қасиеттерін талдамалы және эксперименттік зерттеулер нәтижелері келтірілген. Алынған деректер ұқсас геологиялық жағдайларда әлеуетті қауіпті учаскелердің қауіпсіздігін инженерлі-геологиялық мониторингі кезінде қолданылуы мүмкін.

**ELECTRICAL SURVEY DURING THE ASSESSMENT OF THE DYNAMICS OF SUBSOIL UNUNDATION
IN NUCLEAR ENERGY FACILITIES LOCATIONS (AT THE EXAMPLE OF VVR-K INP)**

M.V. Shulga, A.K. Zholdybayev, N.N. Kusherbayeva

Institute of Geophysical Research of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

The paper demonstrates the results of analytical and experimental study of geo-electrical and deformation properties of sand-argillaceous soil with the application of electrical survey using method of induced polarization, improved at the account of exclusion of impact of electrical resistivity of the subsoil at the example of VVR-K, INP, reactor's location area. The obtained data can be used during engineering and geological monitoring of potentially hazardous objects' safety in similar geological conditions.