

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-5-10>

УДК 550.34.06, 550.8.056

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И СЛАБО ПРОЯВЛЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

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

Филиал «Институт геофизических исследований» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

E-mail для контактов: shaitorov@kndc.kz

В работе приведены результаты полевых наблюдений электроразведочной съёмки методом дипольного электрического зондирования (ДЭЗ-ВП) за период 2018–2020 гг. Для оценки пространственно-временной связи изменений геоэлектрических параметров разреза с проявлениями активной геодинамики были использованы данные по землетрясению, зафиксированному сейсмостанцией «Каскелен» (KASK). Приведены результаты совместного мониторинга геоэлектрических параметров и естественного сейсмического поля.

Ключевые слова: электроразведка, электрическое сопротивление, поляризуемость, дисперсия, обводнённость, деформационные процессы.

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой составляющей обеспечения безопасности эксплуатации объектов атомной отрасли является мониторинг инженерно-геологических условий их размещения [1]. В Казахстане целесообразность решения подобных задач определена в [2], где предусмотрен контроль за медленными геологическими и инженерно-геологическими процессами, в том числе сейсмическими.

Для выявления и отслеживания структурно-вещественных изменений в грунтах, вследствие изменения их напряженно-деформированного состояния и обводнённости, рекомендуется привлечение геофизических методов, в том числе электроразведки методом сопротивлений. При этом, как показано в [3], электрическое сопротивление является очень чувствительным детектором изменения напряженного состояния породы. При динамических нагрузках изменения скорости продольных волн не превышают 5–7%, тогда как изменения электрического сопротивления достигают до 100–200%.

Для некоторых объектов атомной отрасли Казахстана проведены с положительным результатом исследования по оценке информационных возможностей электроразведки в параметрах электрического сопротивления и поляризуемости для выявления и мониторинга изменений обводнённости грунтов во времени [4, 5]. Однако, при всей ценности полученных данных, их недостаточно для количественных оценок техногенных и природных изменений геологической среды, которые необходимы для диагностики и прогноза состояния породных массивов и грунтов в районах размещения объектов атомной отрасли.

Целевым назначением исследований ставилось повышение достоверности выявления и мониторинга изменений обводнённости грунтов и слабо проявленных геодинамических процессов в них в геоэлектрических параметрах на примере площадки КИР «Бай-

кал-1» и геофизического полигона «Каскелен». Результаты этих исследований являются предметом рассмотрения в настоящей статье.

1 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Информационную основу для выполнения целевого задания составили результаты мониторинговых наблюдений геоэлектрических параметров, выполненных на территории, прилегающей к площадке КИР «Байкал-1» по одним и тем же профилям. Взаимосвязь электрического сопротивления геологической среды и слабо проявленных геодинамических процессов в ней оценивалась на геофизическом полигоне «Каскелен» по реакции электрического сопротивления геологической среды на слабо проявленные геодинамические процессы в ней, вызванные контролируемым источником упругих колебаний и землетрясением.

1.1 Повышение достоверности выявления и мониторинга изменений обводнённости грунтов в геоэлектрических параметрах на примере площадки КИР «Байкал-1»

Полевые наблюдения включали электроразведочные съёмки методом дипольного электрического зондирования (ДЭЗ-ВП) на площадке, прилегающей к площадке КИР «Байкал-1» (рисунок 1), выполненные в период 2018–2020 гг. Измерения электрического сопротивления и поляризуемости проведены с использованием генератора ГЭР-65W-500V и измерителя ВПФ-210-8к (РГП ИГИ-2015) с шагом 10 м, погрешность измерений электрического сопротивления была не хуже $\pm 0,1\%$, поляризуемости – $\pm 0,02^\circ$. Обработка данных включала расчёт значений кажущегося электрического сопротивления (ρ_k) и фазового параметра поляризуемости ($\varphi_{вп}$) по всем точкам измерения.

Повышение достоверности оценки обводнённости разрезов обеспечивалось расчётом параметра относительной поляризуемости [6] путём нормирования измеренного фазового параметра на электричес-

кое сопротивление. Эта процедура позволяла исключить влияние изменения электропроводности среды на измеряемую кажущуюся поляризуемость. По данным измерений построены геоэлектрические разрезы в параметрах электрического сопротивления ρ_k и относительной поляризуемости η^* . Относительная погрешность съемки, оцененная по результатам контрольных измерений, составила не хуже $\pm 5\%$, что соответствует требованиям инструкции по электроразведке [7].



1 – ориентировочный контур территории реактора;
2 – линии геофизических профилей

Рисунок 1. Площадка КИР «Байкал-1». Система полевых наблюдений

На рисунке 2 приведены результаты мониторинга электрического сопротивления по линии профиля 1.

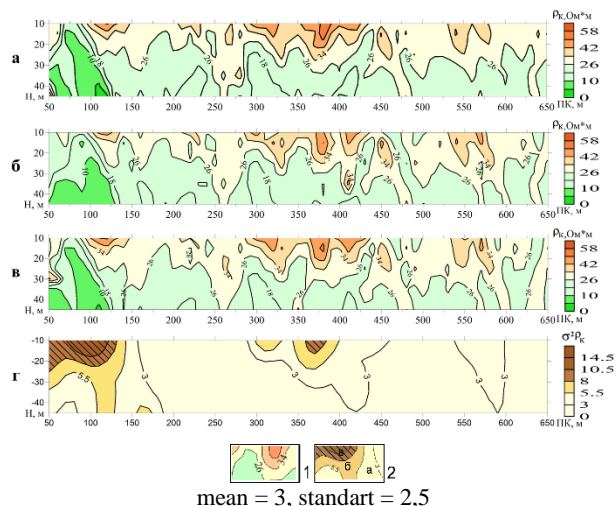
В разрезах ρ_k anomalously повышенной электропроводностью характеризуется интервал ПК25-100–120. Очевидно, что в этом же интервале следует ожидать максимальных изменений электропроводности во времени.

Для повышения достоверности оценок пространственно-временной динамики электрического сопротивления привлечены методы математической статистики, в частности – расчет дисперсии этого параметра согласно [8]:

$$\sigma^2 x = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{(n - 1)},$$

где \bar{x} – выборочное среднее, n – размер выборки.

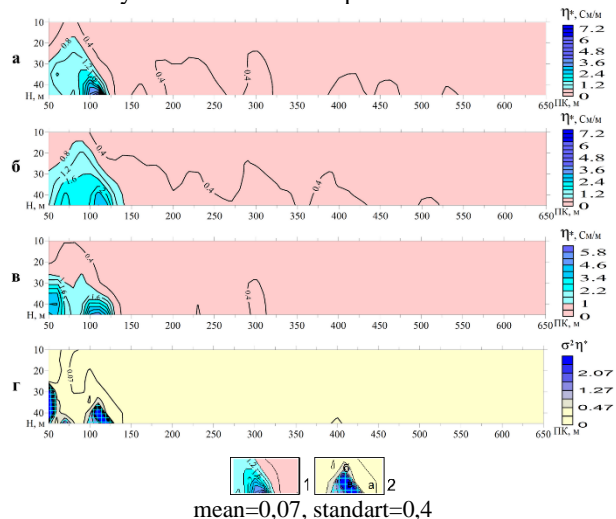
В соответствии с рисунком 2-г, видно, что максимальной динамикой электрического сопротивления во времени характеризуются интервалы разреза ПК50-150 и 350-380 и охватывают преимущественно верхнюю часть разреза не глубже 20 метров.



1 – изолинии кажущегося электрического сопротивления ρ_k ; 2 – изолинии дисперсии $\sigma^2 \rho_k$ по данным наблюдений за три года и области значений этого параметра: а – фоновых, с изменениями, не превышающими стандартного отклонения от среднего, б – повышенных, с изменениями до удвоенного стандартного отклонения, в – anomalously повышенных, с изменениями более удвоенного стандартного отклонения

Рисунок 2. Площадка КИР «Байкал-1», профиль 1. Результаты мониторинга инженерно-геологических условий в электрическом сопротивлении ρ_k по данным ДЭЗ-ВП 2018 (а), 2019 (б), 2020 (в) годов и в параметре дисперсии электрического сопротивления $\sigma^2 \rho_k$ (г) за этот период

В параметре относительной поляризуемости, как показано на рисунке 3, anomalously повышенные ее значения установлены в интервале ПК50-125.



1 – изолинии относительной поляризуемости η^* ; 2 – изолинии дисперсии $\sigma^2 \eta^*$ по данным наблюдений за три года и области значений этого параметра: а – фоновых, с изменениями, не превышающими стандартного отклонения от среднего, б – повышенных, с изменениями до удвоенного стандартного отклонения, в – anomalously повышенных, с изменениями более удвоенного стандартного отклонения

Рисунок 3. Площадка Байкал-1, профиль 1. Результаты мониторинга инженерно-геологических условий в относительной поляризуемости η^* по данным ДЭЗ-ВП 2018 (а), 2019 (б), 2020 (в) годов и в параметре дисперсии относительной поляризуемости $\sigma^2 \eta^*$ (г) за этот период

При этом в зависимости от времени съемок, визуально наблюдается изменение размеров аномальной зоны как по латерали, так и на глубину. Более объективные данные по динамике относительной поляризуемости получены в параметре дисперсии $\sigma^2\eta^*$.

Из рисунка 3-г видно, что в отличие от электрического сопротивления, области максимальной проявленности динамики относительной поляризуемости (ПК50-125) относятся к более глубинной части разреза. При этом в параметре дисперсии имеет место фактически две вертикально вытянутые аномальные зоны. В целом полученные данные свидетельствуют, что максимальной динамикой геоэлектрических параметров характеризуется интервал разреза ПК50-125. При этом в совокупности они охватывают практически весь диапазон исследованных глубин (10–45 метров).

В рассмотренном примере имели место аномальные эффекты, связанные с изменением обводненности разреза, представленного песчаниками, кремнистыми и углисто-кремнистыми алевролитами, в том числе и продуктами коррозирования по ним. Полагается, что наиболее вероятной причиной этих эффектов послужили проявления активной гидродинамики и деформационных процессов, следствием которых стало перераспределение поровой влаги по геодинамически активным зонам, что, вполне вероятно, должно сопровождаться снижением нагрузочной способности грунтов.

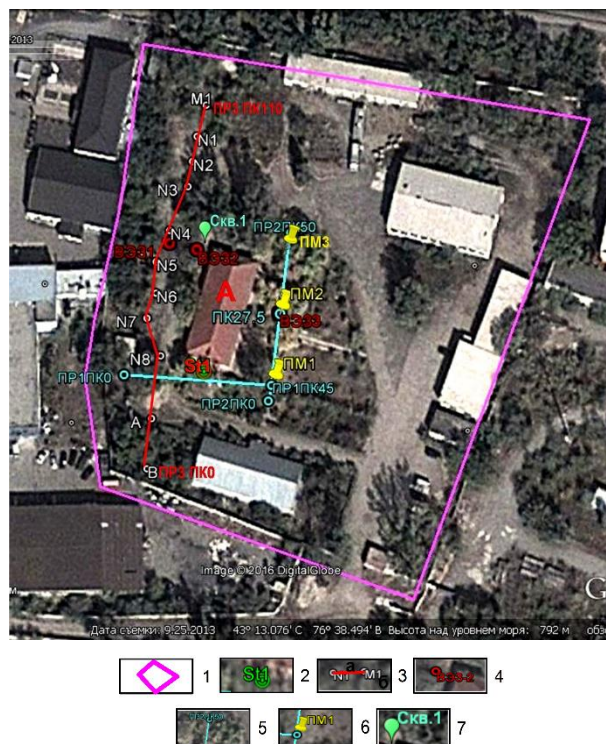
1.2 Оценка реакции электрического сопротивления геологической среды на слабо проявленные геодинамические процессы в ней

Исследования выполнены с использованием мониторинговой сети геофизического полигона «Каскелен» (рисунок 4).

Однозначный ответ на взаимосвязь деформационных процессов и электрического сопротивления получен в экспериментах, проведенных с контролируемым источником деформационных процессов. В качестве такого источника использован «падающий груз» массой 40 кг с высоты 4 метра. Всего было сделано 5 ударов таким грузом. Результаты этого эксперимента приведены на рисунке 5.

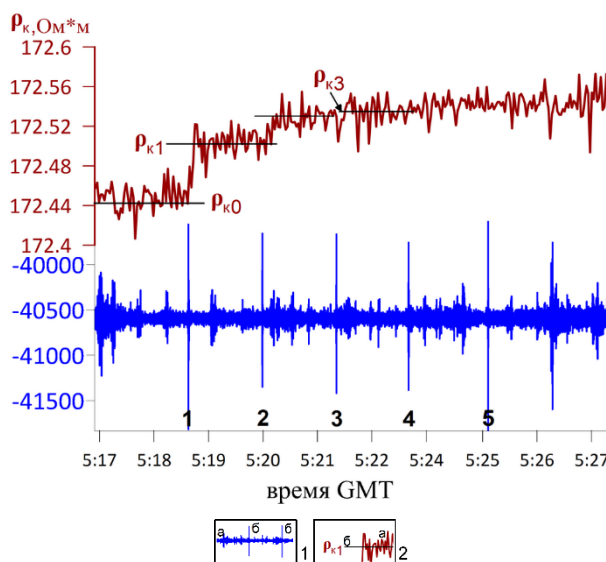
Как видно из рисунка, после первого удара произошло повышение электрического сопротивления на 0,03%, после второго – на 0,02%, после третьего – всего лишь на 0,003%. Последующие удары к значимым изменениям в сопротивлении не приводили.

Полагается, что при первых двух ударах происходило уплотнение грунта, вследствие чего наблюдалось повышение его электрического сопротивления, а при последующих – возрастала доля энергии на упругое воздействие и уплотнения (деформации) практически не наблюдалось.



1 – контур территории «Каскелен»; 2 – сейсмостанция; 3 – фрагмент электроразведочного профиля (а) и элемент приёмной линии (б) дипольной установки электрического зондирования; 4 – точка вертикального электрического зондирования; 5 – профили и пикеты атмосферохимической съёмки CO₂; 6 – пункты мониторинга метана; 7 – положение скважины

Рисунок 4. Геофизический полигон «Каскелен». Экспериментальная сеть мониторинга

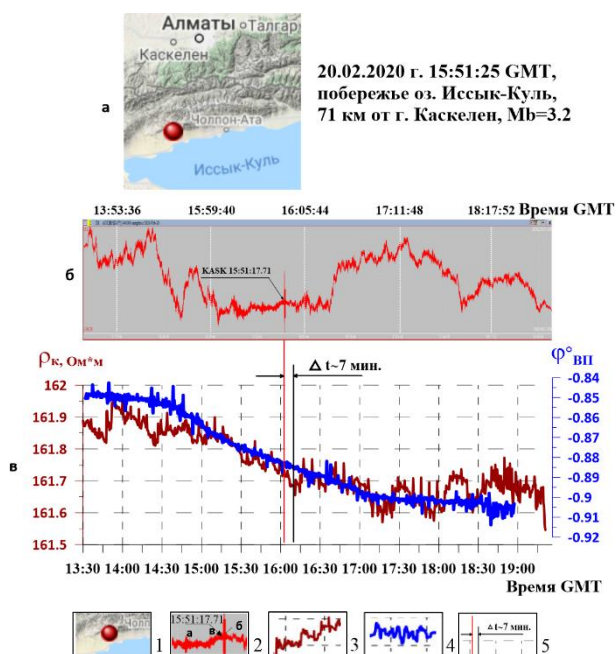


1 – трасса акселерограммы (а) и запись в ней ударов (б); 2 – график изменения электрического сопротивления (а) на глубине 20 метров и линии средних значений этого параметра (б) до и после деформационного воздействия на песчано-глинистую среду; 1–5 – номера ударов грузом 40 кг с высоты 4 метра через 1–2 минуты

Рисунок 5. Геофизический полигон «Каскелен». Оценка реакции электрического сопротивления на деформационное воздействие контролируемым поверхностным источником упругих колебаний

Таким образом, показана однозначная связь электрического сопротивления с деформационными процессами в песчано-глинистых грунтах. При этом аномальные эффекты в параметре электрического сопротивления могут использоваться в качестве диагностического признака деформационных процессов в таких грунтах.

Для оценки пространственно-временной связи изменений геоэлектрических параметров разреза с проявлениями активной геодинамики использованы данные по землетрясениям, зафиксированным сейсмостанцией «Каскелен» (KASK). В нашем случае проанализированы данные по проявленности в геоэлектрических параметрах землетрясения 20 февраля 2020 года, эпицентр которого находился на удалении 71 км от сейсмостанции (рисунок 6).



1 – эпицентр землетрясения; 2 – акселерограмма (а) с записью землетрясения (б) и времени регистрации (в) сейсмостанцией KASK; 3, 4 – графики вариаций кажущегося электрического сопротивления (3) и поляризуемости (4); 5 – время запаздывания реакции геоэлектрических параметров на землетрясения, принятые сейсмостанцией KASK

Рисунок 6.. Геофизический полигон «Каскелен». Проявленность сейсмического события (а) в акселерограмме (б) и геоэлектрических параметрах (в)

По этому сейсмическому событию, согласно с рисунками 6-б, в, следует отметить, что примерно через 7 минут после его регистрации акселерометром отмечилось локальное, в течение 15 минут, понижение электрического сопротивления на 0,1%. Через 30 минут имело место резкое возрастание амплитуды знакопеременных колебаний значений этого параметра, составившее величину порядка $\pm 0.1\%$ при погрешности измерений $\pm 0,01\%$.

В поляризуемости в этом интервале времени значимых изменений не установлено.

В целом, приведенные данные практически подтвердили выводы по экспериментам с контролируемым источником упругих колебаний в части взаимосвязи электрического сопротивления с деформационными процессами в грунтах. Кроме того, показана достаточность чувствительности применённой измерительной системы для регистрации сигналов от слабо проявленных деформационных процессов в песчано-глинистых грунтах.

В то же время, учитывая высокий уровень помех сейсмического происхождения, проявленных и в геоэлектрических параметрах, для повышения достоверности оценок пространственно-временной связи аномальных изменений этих параметров с сейсмическими событиями необходимо привлекать и данные по особенностям структуры их волновых полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены исследования по повышению достоверности выявления и мониторинга изменений обводнённости грунтов в геоэлектрических параметрах на примере площадки КИР «Байкал-1» и оценки реакции электрического сопротивления геологической среды на слабо проявленные геодинамические процессы в ней.

Для решения первой задачи при интерпретации данных ДЭЗ-ВП были привлечены элементы математической статистики (дисперсия), что позволило более обоснованно оконтурить области разреза с максимальным изменением электрического сопротивления и поляризуемости во времени. В этих областях, предположительно вызванных проявлениями активной гидродинамики и деформационных процессов, вполне вероятно ухудшение несущих свойств грунтов.

Результаты совместного мониторинга геоэлектрических параметров и естественного сейсмического поля показали пространственно-временную связь аномальных эффектов в электрическом сопротивлении с деформационными процессами искусственного и естественного происхождения.

Последующие исследования должны быть направлены на получение количественных характеристик деформационных процессов по геоэлектрическим параметрам.

Данные исследования финансировались Министерством энергетики Республики Казахстан в рамках научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН – BR09158470).

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. Технический регламент «Ядерная и радиационная безопасность». Утвержден приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 20 февраля 2017 г. – № 58.
3. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. – 2-е изд., стер. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. – 264 с.
4. Шайторов, В.Н., Ефремов М.В., Мариненко В.А., Жолдыбаев А.К., Кушербаева Н.Н., Шульга М.В., Утегенова М.А., Алдабергенова Г.Н. Изучение техногенных изменений геологических сред в геофизических параметрах для мониторинга безопасности объектов атомной отрасли // Вестник НЯЦ РК, 2018. – Вып. 2 (74). – С. 92–99.
5. Шайторов В.Н., Ефремов М.В., Жолдыбаев А.К., Кушербаева Н.Н., Шульга М.В., Утегенова М.А. Оценка возможности выявления и мониторинга слабо проявленных геодинамических процессов и обводнённости грунтов в упругих, геоэлектрических параметрах и газопроницаемости на примере площадки КИР «Байкал-1» // Вестник НЯЦ РК, 2020. – Вып. 3. – С. 38–43.
6. Комаров В.А. О природе электрических полей вызванной поляризации и возможностях их использования при поисках рудных месторождений // Вестник Ленинградского государственного университета. Сер. геол. и геогр. 1957, №16. – С. 37–46 с ил.
7. Инструкция по электроразведке. Ленинград. Недра, 1984.
8. Microsoft Office Excel 2003.

REFERENCES

1. Postanovlenie Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru ot 23 noyabrya 2006 g. No. 5. Ob utverzhdenii i vvedenii v deystvie rukovodstva po bezopasnosti «Monitoring inzhenerno-geologicheskikh usloviy razmeshcheniya ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla». Utverzhdeno i vvedeno v deystvie s 1 marta 2007 g. Rukovodstvo po bezopasnosti «Monitoring inzhenerno-geologicheskikh usloviy razmeshcheniya ob"ektov yadernogo toplivnogo tsikla» (RB 036-06).
2. Tekhnicheskii reglament «Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'». Utverzhden prikazom Ministra energetiki Respubliki Kazakhstan ot 20 fevralya 2017 g. – No. 58.
3. Kuz'min Yu.O., Zhukov V.S. Sovremennaya geodinamika i variatsii fizicheskikh svoystv gornykh porod. – 2-e izd., ster. – Moscow: Izdatel'stvo «Gornaya kniga», 2012. – 264 p.
4. Shaytorov, V.N., Efremov M.V., Marinenko V.A., Zholdybaev A.K., Kusherbaeva N.N., Shul'ga M.V., Utegenova M.A., Aldabergenova G.N. Izuchenie tekhnogennykh izmeneniy geologicheskikh sred v geofizicheskikh parametrah dlya monitoringa bezopasnosti ob"ektov atomnoy otrasli // Vestnik NYaTs RK, 2018. – Issue 2 (74). – P. 92–99.
5. Shaytorov V.N., Efremov M.V., Zholdybaev A.K., Kusherbaeva N.N., Shul'ga M.V., Utegenova M.A. Otsenka vozmozhnosti vyyavleniya i monitoringa slabo proyavlenykh geodinamicheskikh protsessov i obvodnenosti gruntov v uprugikh, geoelektricheskikh parametrah i gazopronitsaemosti na primere ploshchadki KIR «Baykal 1» // Vestnik NYaTs RK, 2020. – Issue 3. – P. 38–43.
6. Komarov V.A. O prirode elektricheskikh poley vyzvannoy polarizatsii i vozmozhnostyakh ikh ispol'zovaniya pri poiskakh rudnykh mestorozhdeniy // Vestnik Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. geol. i geogr. 1957, No. 16. – P. 37–46 s il.
7. Instruksiya po elektrorazvedke. Leningrad. Nedra, 1984.
8. Microsoft Office Excel 2003.

ИНЖЕНЕРЛІК-ГЕОЛОГИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГ КЕЗІНДЕ ЭЛЕКТРБАРЛАУДЫ ҚОЛДАНУ ЖАҒДАЙЛАРЫ МЕН НАШАР КӨРСЕТІЛГЕН ГЕОДИНАМИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕР АТОМ САЛАСЫ ОБЪЕКТІЛЕРІ ОРНАЛАСҚАН АУДАНДАРДА

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

ҚР ҰЯО РМК «Геофизикалық зерттеулер институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста 2018–2020 жылдар кезеңінде дипольді электрлік зондтау (ДЭЗ-ВП) әдісімен электрбарлау түсірілімінің далалық бақылауларының нәтижелері келтірілген. Қиманың геоэлектрлік параметрлері өзгерістерінің белсенді геодинамика көріністерімен кеңістіктік-уақыттық байланысын бағалау үшін «Қаскелең» сейсмостанциясы (KASK) тіркеген жерсілкінулері бойынша деректер пайдаланылды. Геоэлектрлік параметрлер мен табиғи сейсмикалық өрістің бірлескен мониторингінің нәтижелері келтірілген.

Түйін сөздер: электрбарлау, электр кедергісі, поляризациялануы, дисперсия, сулану, деформациялық үдерістер.

**APPLICATION OF ELECTRICAL EXPLORATION FOR THE MONITORING OF ENGINEERING-
GEOLOGICAL CONDITIONS AND POORLY DEVELOPED GEODYNAMIC PROCESSES
AT THE REGIONS OF NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES LOCATION**

V.N. Shaitorov, A.K. Zholdybaev, M.V. Shulga, N.N. Kusherbaeva

Branch "Institute of Geophysical Research" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper presents the results of field observations of electrical survey conducted using the method of dipole electrical sounding induced polarization (DES-IP) for the period 2018–2020. Earthquake data recorded by the Kaskelen seismic station (KASK) were used to assess the spatio-temporal relationship of changes in the geoelectric parameters of the section showing active geodynamics. The results of joint monitoring of geoelectric parameters and natural seismic field are presented.

Keywords: *electrical exploration, electrical resistance, polarizability, dispersion, waterlogging, deformation processes*