
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 624.131.3

ПРОБЛЕМА ВЫЯВЛЕНИЯ ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОН ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ БУШЕРСКОЙ АЭС)

© 2020 г. В. М. Макеев^{1,*}, А. С. Гусельцев^{2,**}, И. М. Кравченко^{3,***}

¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000, Россия

² Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности,
ул. Малая Красносельская, 2/8, к. 5, Москва, 107140 Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*E-mail: vmakeev@mail.ru

**E-mail: gouseltsev@secnrs.ru

***E-mail: kravchenkoilyamax@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.04.2020 г.

После доработки 15.05.2020 г.

Принята к публикации 15.05.2020 г.

В статье рассматривается проблема выявления ослабленных зон при проведении инженерно-геологических исследований. На примере изучения инженерно-геологических условий территории особо опасного и технически сложного объекта атомной электростанции “Бушер” показана необходимость выделения и разностороннего изучения ослабленных зон, включая определение их происхождения. Для достижения этих целей использованы данные о геологическом строении изучаемой площадки, полученные в ходе бурения скважин и вертикального сейсмопрофилирования, а также данные о плотностных и физико-механических свойствах грунтов и результаты многолетних геодезических наблюдений за кренами основных сооружений комплекса атомной станции. Установлено, что площадка АЭС, включая грунтовое основание реакторного отделения № 1, пересекается ослабленными зонами, образование которых связано с зонами погребенных разломов и техногенным влиянием основных сооружений атомной станции. Эти зоны, не выявленные в ходе инженерно-геологических изысканий и не учтенные при проектировании атомной станции, являются причиной развития неравномерных осадок грунтовых оснований зданий АЭС. Обнаружение и комплексное изучение ослабленных зон крайне важны для обеспечения безопасного строительства и эксплуатации таких особо опасных объектов, как атомные станции.

Ключевые слова: ослабленные зоны, неравномерные осадки, грунтовое основание, Бушерская атомная электростанция, крены зданий, вертикальное сейсмопрофилирование

DOI: 10.31857/S0869780920050057

ВВЕДЕНИЕ

Понятие “ослабленная зона” довольно широко используется в различных областях знаний, в том числе и в естественных науках. Так, в геологии, в зависимости от смысла, вкладываемого в происхождение ослабленных зон, они могут рассматриваться как геодинамически активные зоны [2, 4], диаклазовые швы и внутриразломные зоны [7], зоны суперинтенсивных деформаций [3], области динамического влияния разломов кристаллического фундамента [10] и другие.

Формирование ослабленных зон наиболее часто связывается с механическими колебаниями, происходящими в зонах погребенных веществ-

но-структурных неоднородностей (разломов, контактов, разделов). Причина колебаний — разгрузка неравномерно распределенных тектонических напряжений, которые передаются от зон древних неоднородностей вверх по осадочному чехлу, провоцируя в нем образование зон повышенной трещиноватости горных пород, а также увеличение интенсивности восходящих газово-флюидных и тепловых потоков [2, 6].

С ослабленными зонами связывается образование гидрогеологических окон и геофизических аномалий [2, 6], а также повышенная инфильтрация поверхностных загрязнителей в водоносные горизонты, формирование ландшафтных анома-

лий на геохимических барьерах с высокими концентрациями химических элементов различных классов опасности [5, 14]. С этих позиций оценивается геоэкологическая значимость выявления и изучения ослабленных зон.

С инженерно-геологических позиций ослабленные зоны, как правило, рассматриваются как структуры, в которых плотностные и прочностные характеристики горных пород ниже, чем в окружающем их массиве, что создает благоприятные условия для локализации и интенсивного развития многих экзогенных процессов: эрозионных, карстово-суффозионных, оползневых, оседаний и провалов, которые в конечном счете могут привести к нарушению безопасной эксплуатации инженерных сооружений, построенных в пределах таких зон, их кренам и разрушению [4, 7, 8, 11].

Как правило, инженерно-геологические исследования в целом не нацелены на прямое выявление и изучение ослабленных зон. Тем не менее, такие методы, как бурение инженерно-геологических скважин с последующим лабораторным изучением отобранных образцов грунтов, геофизические исследования, в том числе методом спектрального сейсмопрофилирования, а также методы дистанционного зондирования способны помочь инженер-геологам в выявлении и изучении ослабленных зон [1].

С нашей точки зрения, особенно актуальны те методы, с помощью которых можно получить необходимую геологическую информацию без нарушения целостности грунтовых массивов. Подобный подход крайне важен при выполнении работ в районах расположения таких особо опасных, технически сложных и уникальных объектов, как АЭС, и тем более, если вблизи участка исследований находятся инженерные сооружения в аварийном или в предаварийном состоянии [9].

Данное исследование посвящено выявлению ослабленных зон в пределах площадки Бушерской АЭС, которая расположена в Иране вблизи г. Бушер. Ее строительство началось в 1975 г., а первый энергоблок был впервые запущен лишь в 2011 г. Примечательно, что во время возведения зданий атомной электростанции фиксировались крены их фундаментов, что можно связать с наличием ослабленных зон в грунтовых основаниях сооружений станции, которые не были выявлены и изучены на этапе инженерно-геологических изысканий. Планы ввода к 2026 г. в эксплуатацию двух новых энергоблоков обуславливают особую актуальность обозначенной проблемы.

ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПЛОЩАДКИ АЭС “БУШЕР”

В геологическом отношении рассматриваемая территория представлена песчано-глинистыми

отложениями плиоценового возраста мощностью более 100 м (формация Агаджари), перекрытыми покровными органогенно-обломочными отложениями (саргоск) средне- и позднечетвертичного возраста мощностью от 1 до 4,5 м. На “кэпроке” залегают современные эоловые пески небольшой мощности. Они в совокупности с вышеупомянутыми отложениями слагают асимметричную антиклиналь северо-западного — юго-восточного простирания, у которой северо-восточное крыло более крутое, чем юго-западное, где и расположена площадка АЭС “Бушер”. Примечательно, что между песчано-глинистыми отложениями и “кэпроком” отмечен перерыв в осадконакоплении и угловое несогласие [12, 13].

В 1975 и 1976 гг. на территории Бушерской АЭС проводились инженерно-геологические изыскания американской фирмой “Dames&Moore”, на основе материалов которых путем анализа пространственной изменчивости физических и физико-механических свойств грунтов, выявления гидрогеохимических аномалий, а также посредством дешифрирования аэрофотоснимков удалось выделить три тектонически ослабленные зоны: 1) Магистральная (Мг), 2) Безымянная (Бз) и 3) Катар-Казерунская (Кк) (рис. 1).

Магистральная зона пересекает западную часть площадки АЭС. В ее пределах отмечаются повышенный коэффициент фильтрации грунтов и заметные геохимические аномалии состава подземных вод, возможно связанных с нефтяным месторождением Бушерской антиклинали. За площадкой в северо-западном направлении рассматриваемая зона проявлена сгущением изогипс деформаций надпояжных террас и эрозионными бровками некоторых долин, развивающихся в сезон дождей.

Безымянная зона “проходит” севернее площадки АЭС, за пределами которой она выражена в изогипсах деформаций морских террас, качественно характеризующих ее подвижность. С зоной согласуются эрозионная бровка бухты Халиле, русловые врезы и некоторые бессточные ложбины полуострова. Безымянная зона, как и Магистральная, является протяженной транзитной, что позволяет связывать ее с древними разломами, находящимися в складчатом основании мезозойско-палеозойских отложений.

Катар-Казерунская зона выделена в юго-восточной оконечности площадки АЭС и прослежена за ее пределами. Ее образование связывается с одноименным разломом или структурной линией, выраженной в рельефе. Согласно результатам дешифрирования аэрофотоснимков и данным инженерно-геологических изысканий, разлом рассматривается в качестве зоны повышенной геодинамической активности и, соответственно, в качестве сейсмогенерирующего. В связи с этим

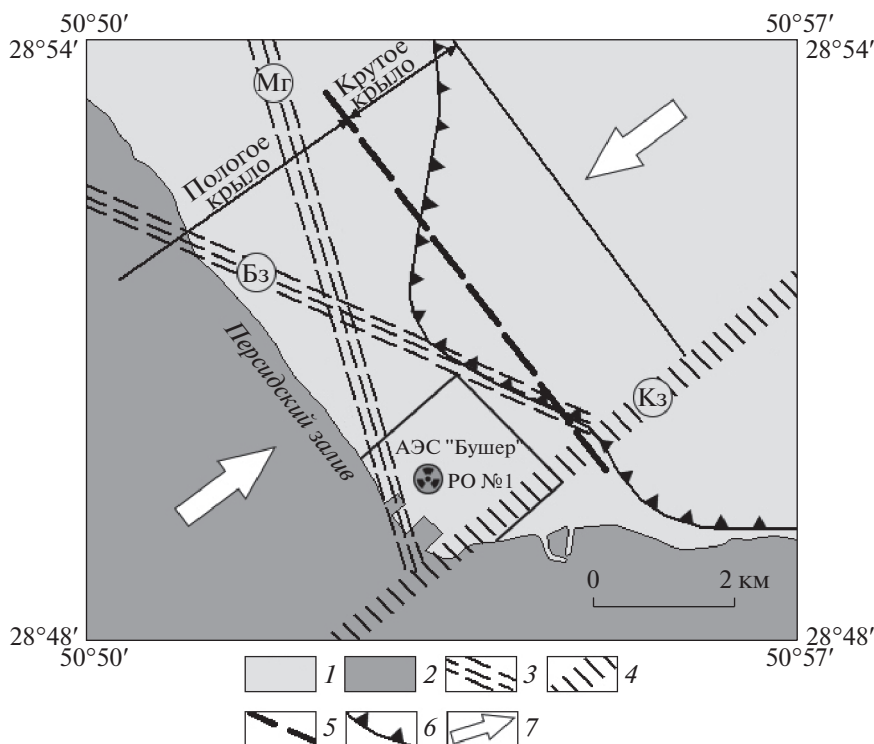


Рис. 1. Тектоническая схема юго-восточной части Бушерского полуострова.

1 – позднелицен-четвертичные отложения; 2 – Персидский залив; 3 – современные ослабленные зоны: Мг – Магистральная, Бз – Безымянная; 4 – погребенный Катар-Казерунский мезозойский разлом (Кз), 5 – ось антиклинальной складки; 6 – граница маршей (бергштрихи направлены в сторону новейшего прогиба); 7 – ориентация действующих напряжений.

роль сопутствующей ему ослабленной зоны становится более значимой, чем как зоны грунтов с пониженными плотностными и физико-механическими свойствами, так как ее влияние на площадку следует рассматривать не только с геомеханических, но и сейсмотектонических позиций.

ОСЛАБЛЕННЫЕ ЗОНЫ В ГРУНТОВОМ ОСНОВАНИИ РЕАКТОРНОГО ОТДЕЛЕНИЯ № 1

В связи с возобновлением строительства Бушерской АЭС в 1998–1999 гг. иранскими и российскими организациями (“Mahab Ghodss”, АО “ПНИИИС”, ИФЗ РАН и др.) проводилось дополнительное исследование инженерно-геологических условий рассматриваемой территории, в том числе с применением геофизических методов. Особое внимание было уделено изучению грунтового основания реакторного отделения № 1 (РО № 1) (рис. 2), которое, на протяжении всего срока строительства испытывало неравномерные осадки.

Результаты вышеупомянутых исследований, а также материалы инженерно-геологических изысканий 1975–1976 гг. позволили обозначить в основании РО № 1 несколько ослабленных зон,

выделение которых основано, прежде всего, на анализе данных скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, полученных методом вертикального сейсмопрофилирования (ВСП) между скважинами С1, С2 и С3. Данный геофизический метод позволяет оценить изменчивость скоростей сейсмических волн, проходящих через те или иные грунты, и связать ее с изменчивостью их плотностных и физико-механических свойств.

По результатам ВСП был построен ряд профилей поперечных и продольных волн; их длина составила 80–90 м, глубина – почти 100 м. В данной статье предлагается детально рассмотреть профили распределения V_p между скважинами С3 и С1, С2 и С3, как наиболее представительные и информативные. Отметим, что в изучаемом грунтовом массиве в целом наблюдается снижение V_p (с 2100 до 1300 м/с) и V_s (с 745 до 400 м/с) от РО № 1 в юго-западном направлении.

1. На профиле С3–С1 (рис. 3) на фоне изменения скоростей продольных волн проявляются несколько аномальных зон линейной и округлой формы. Так, отчетливо выделяется протяженная по глубине заложения зона “б” повышенных скоростей продольных волн, круто погружающаяся от скважины С3 в направлении скважины С1 на

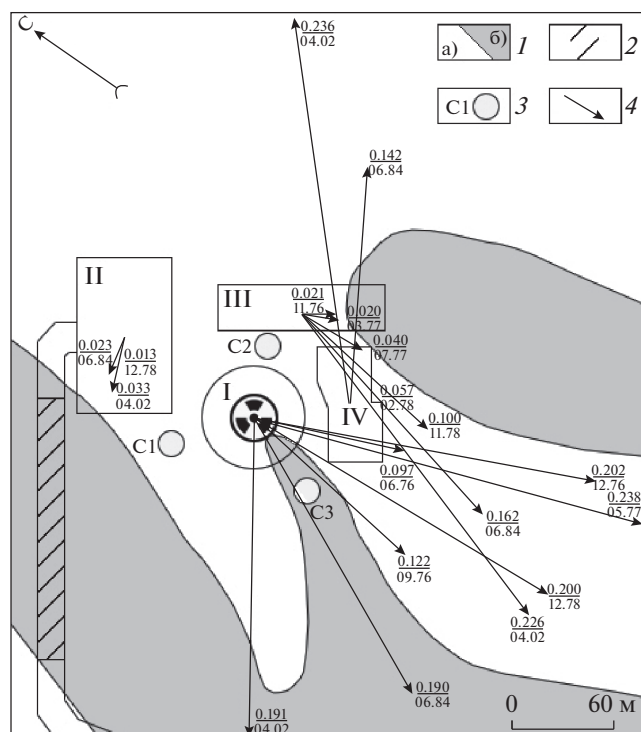


Рис. 2. Осадки фундаментов основных зданий АЭС “Бушер”. 1 – грунты: а) с ненарушенным сложением, б) относительно нарушенные (разуплотненные); 2 – участок деформации железобетонного трубопровода; 3 – скважины для вертикального сейсмопрофилирования (ВСП). Основные здания АЭС: I – реакторное отделение № 1, II – машинный зал, III – спецкорпус, IV – здание приема и переработки отработанного ядерного топлива; 4 – направление кренов (стрелки); цифры: в числителе – значения крена относительно критической величины, равной 1; в знаменателе – месяц и год измерений.

глубины от 0 до 90 м и более. Почти параллельно ей выделены еще две линейные зоны: зона “а” с пониженными V_p , для которой на участке профиля от 45 до 50 м характерен небольшой “уступ”, после которого она имеет более крутое падение; а также зона “в”, залегающая на глубине от 35 м и более, характеризующаяся увеличенными V_p , что отчасти роднит ее с зоной “б”.

Зоны “а”, “б” и “в” проявились и в распределении скоростей поперечных волн, что в совокупности с линейным распространением говорит об их естественном происхождении, а изменчивость их формы (особенно зоны “а”) отражает техногенное воздействие на них реакторного отделения № 1. При этом зона “а”, характеризующаяся пониженными значениями V_p , является ослабленной.

Зона округлой формы “г” отчетливо выделяется в интервале профиля 50–80 м на глубинах 0–25 м; она выражена аномально высокими скоростями продольных волн (от 1900 до 2100 м/сек). Сопо-

ставление полученных данных с материалами инженерно-геологических изысканий, выполненных на проектной стадии строительства РО № 1, показывает, что данная округлая зона не должна выделяться; это указывает на ее техногенное происхождение.

2. На профиле С2–С3 (рис. 4) также отчетливо выделяются зоны аномального распределения скоростей продольных волн: протяженные (“д”, “е” и “ж”), имеющие угол падения около 45° , и относительно короткие по глубине заложения, падающие навстречу первым (“з”, “и”).

Вытянутые зоны “е” и “ж”, выделенные по увеличению скоростей продольных волн, погружаются в направлении от скважины С2 в сторону скважины С3 на глубину от 20 до 50 м и более. Между ними, почти параллельно, прослеживается еще одна, более протяженная зона “д”, которая отвечает снижению V_p и является ослабленной. Она кулисообразно погружается с глубины 10 м до 65 м и более, что может указывать на ее сдвиговое происхождение. В распределении V_s также установлены похожие зоны. В целом, глубины залегания и протяженность зон “е”, “ж” и “д” говорит об их естественном тектоническом происхождении, однако их размеры и форма были техногенно изменены в процессе нагружения реакторного отделения № 1. Так, зоны “з” и “и”, выраженные незначительным увеличением V_p , имеют локальный характер распространения и пересекают зону “д” на глубинах 15–20 и 40–45 м соответственно; зона “з” также пересекает зону “ж” на глубине 32–36 м. В распределении скоростей поперечных волн зоны со встречным характером падения не установлены, что может говорить в пользу их техногенного происхождения.

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПЛОЩАДКИ БУШЕРСКОЙ АЭС

Наличие ослабленных зон в пределах площадки Бушерской АЭС подтверждается данными геодезических наблюдений. Так, за период 1976–2002 гг. в процессе строительства РО № 1 и вспомогательных зданий (машинный зал, спецкорпус и др.) осадки их грунтовых оснований происходили неравномерно, а с периодическими “срывами”, что вызывало крены фундаментов по часовой стрелке с восточных румбов в южные (см. рис. 3). Примечательно, что этот процесс происходил независимо от глубин заложения фундаментов зданий и сооружений и их тяжести.

В начале строительства РО № 1 в июне 1976 г. крен его основания составил 0.097 относительно критической единицы (отн. кр. ед.). Позднее, вследствие загрузки здания тяжелым оборудованием в сентябре 1976 г. крен подскочил до величины 0.122 отн. кр. ед., а в декабре 1976 г. – до

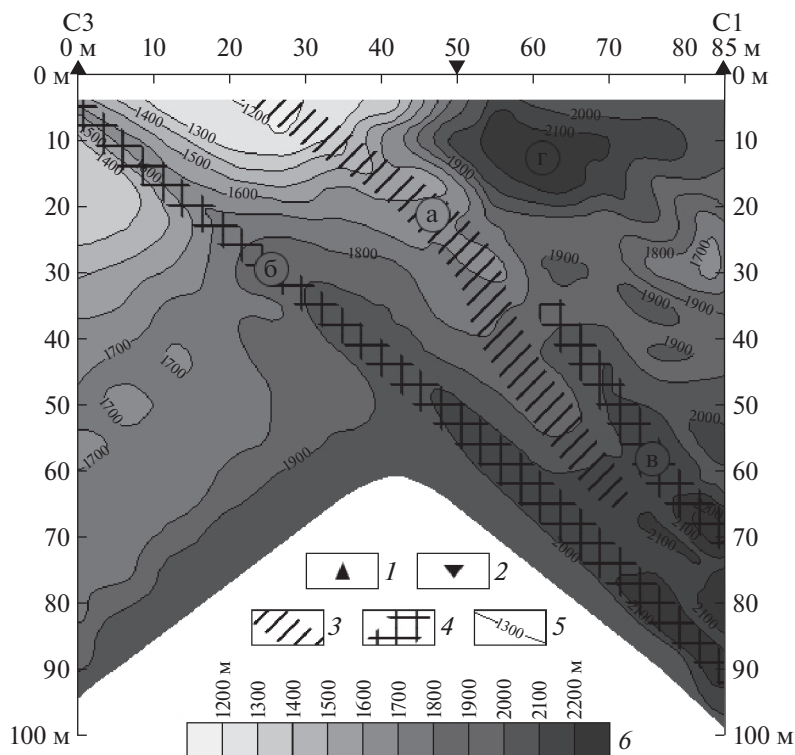


Рис. 3. Распределение скоростей продольных волн (V_p) в грунтовом основании реакторного отделения № 1 между скважинами C1 и C3. 1 – скважины (C1 и C3); 2 – пункт удара; 3 – ослабленная зона “а”, выраженная понижением V_p ; 4 – зоны, выраженные повышением V_p (“б”, “в” и “г”); 5 – изолинии V_p , м/с; 6 – шкала скоростей продольных волн.

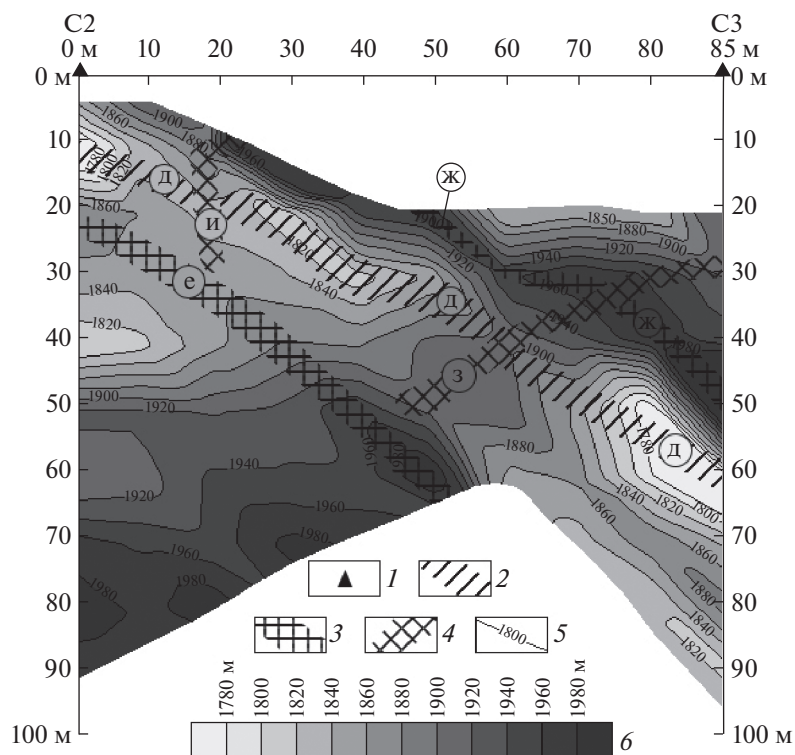


Рис. 4. Профиль распределения скоростей продольных сейсмических волн (V_p) в грунтовом основании реакторного отделения № 1 между скважинами C2 и C3 (пункт удара находится в 98 м от скважины C3). 1 – скважины (C2 и C3); 2 – ослабленная зона “д”, выраженная понижением V_p ; зоны, выраженные повышением V_p : 3 – естественные (“е”, “ж”), 4 – техногенно-обусловленные (“и”, “з”); 5 – изолинии V_p , м/с; 6 – шкала скоростей продольных волн.

0.202 отн. кр. ед. При этом направленность смещений фундамента РО № 1 менялась в юго-восточных румбах. После декабря 1976 г., когда прекратилась интенсивная загрузка здания реакторного отделения, оно продолжало оседать неравномерно и при этом разворачивалось строго по часовой стрелке в сторону тектонически ослабленной Магистральной зоны. Это происходило следующим образом: в мае 1977 г. крен составил 0.238 отн. кр. ед. в ВЮВ направлении, в декабре 1978 г. — 0.200 отн. кр. ед. в ЮВ направлении, в июне 1984 г. — 0.190 отн. кр. ед. в ЮЮВ направлении, а в апреле 2002 г. — 0.191 отн. кр. ед. строго в южном направлении.

Процесс поворота кренов характерен и для относительно легких сооружений неглубокого заложения. Так, спецкорпус испытывал постоянное увеличение кренов по мере его загрузки: в декабре 1976 г. и 1978 г. крены составляли 0.021 и 0.020 отн. кр. ед. соответственно, а с марта 1977 г. по 2002 г. они увеличились с 0.020 до 0.226 отн. кр. ед. Исключением стал март 1977 г., когда крен составлял 0.200 отн. кр. ед. При этом с увеличением осадки здание устойчиво кренилось по часовой стрелке в сторону Магистральной зоны: сначала крен был направлен строго на восток, а потом — на ЮВ. В подобной ситуации находились машинный зал и другие здания атомной станции.

По нашему мнению, основной причиной развития вышеописанных кренов является наличие в грунтовых основаниях сооружений АЭС ослабленных зон, для которых характерны пониженные плотностные и физико-механические характеристики. Вероятно, ситуация усугубилась процессом суффозии, которая провоцировалась постоянно осуществляющимся принудительным и естественным дренажем площадки атомной электростанции. К примеру, принудительный интенсивный дренаж с целью проведения земельных работ осуществлялся во время возобновления строительства АЭС в 2000 г., в результате чего коэффициент фильтрации грунтов мог быть увеличен на порядок, что не могло не сказаться на поведении ослабленных зон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в пределах юго-восточной части Бушерского полуострова выделено несколько транзитных тектонических зон, которые отчасти пересекают площадку Бушерской атомной электростанции. Согласно геодезическим наблюдениям, крены основных зданий и сооружений АЭС неуклонно разворачиваются в сторону расположения этих зон.

Анализ данных вертикального сейсмопрофилирования позволил установить в пределах грунтового основания РО № 1 зоны снижения и увеличения скоростей продольных и поперечных

волн. Первые связываются с пониженными плотностными и физико-механическими характеристиками грунтов и относятся к ослабленным; они протяженные и согласуются с зоной древнего Магистрального разлома, что указывает на их естественное тектоническое происхождение, однако их форма техногенно “скорректирована” под воздействием РО № 1.

В свою очередь зоны, выраженные увеличенными скоростями сейсмических волн, можно разделить на два типа: 1) транзитные линейно вытянутые, образование которых связано с естественным развитием геологической среды; 2) локальные короткие, а также одна округлой формы. Их образование, вероятно, имеет техногенный характер и связано с уплотнением грунтового основания реакторного отделения в процессе его возведения и загрузки.

По нашему мнению, ослабленные зоны, не выявленные в ходе инженерно-геологических изысканий и неучтенные на этапе проектирования Бушерской АЭС, стали причиной развития неравномерных осадок грунтовых оснований зданий атомной электростанции. Постоянный принудительный и естественный дренаж изучаемой площадки, вероятно, спровоцировал активизацию суффозионных процессов, которые усугубили сложившуюся ситуацию.

Также следует отметить, что на границах зон с резким различием плотностных и прочностных свойств грунтов возможно образование сдвиговых напряжений и деформаций, которые, переходя некое критическое значение, способны вызывать сверхнормативные крены инженерных сооружений.

Результаты выполненных исследований показывают, что решение задач выявления и изучения ослабленных зон является крайне важным для обеспечения безопасного строительства и эксплуатации таких особо опасных объектов, как атомные электростанции.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания и плана НИР по теме № г.р. АААА-А19-119021190076-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Викторов А.С., Макаров В.И.* Аэрокосмические методы при решении инженерно-геологических проблем // *Геоэкология*. 1999. № 5. С. 466–471.
2. *Дорожко А.Л., Макеев В.М., Батрак Г.И., Позднякова И.А.* Геодинамически активные зоны и линейные аменты и их геоэкологическое значение // *Геоэкология*. 2015. № 2. С. 173–183.
3. *Кузьмин Ю.О.* Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // *Геодинамика и тектонофизика*. 2014. № 5 (2). С. 401–443.

4. Макарова Н.В., Макеев В.И., Дорожко А.Л. Геодинамические системы и геодинамически активные зоны ВЕП // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. 2016. Т. 91. № 4–5. С. 9–26.
5. Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. ун-т, 2011. 248 с.
6. Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б. Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Перо, 2016. 394 с.
7. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, 2012. 560 с.
8. Пашкин Е.М., Панкратов А.В. Природные аттракторы в геоэкологии. Статья II. Линеаменты в роли природных аттракторов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2002. № 5. С. 84–95.
9. Пендин В.В., Фоменко И.К. Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: Ленанд, 2015. 320 с.
10. Трегуб А.И. Разрывные нарушения в фундаменте и осадочном чехле территории Воронежского кристаллического массива // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2000. № 10. С. 7–15.
11. Хоменко В.П. Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.
12. Berberian M. Active faulting and tectonics of Iran // Zagros, Hindu Kush, Himalaya: Geodynamic Evolution. Gupta H., Delany F. (eds.). Washington, D.C., American Geophysical Union, 1981. V. 3. 1981. P. 33–69.
13. Falcon N.L. Major earth-flexuring in the Zagros mountains of south-west Iran // Quarterly Journal of the Geological Society. 1961. V. 117. P. 367–376.
14. Rumynin V.G., Nikulenkov A.M. Geological and physicochemical controls of the spatial distribution of partition coefficients for radionuclides (Sr-90, Cs-137, Co-60, Pu-239,240 and Am-241) at a site of nuclear reactors and radioactive waste disposal (St. Petersburg region, Russian Federation) // Journal of Environmental Radioactivity. 2016. V. 162–163. P. 205–218.

THE PROBLEM OF IDENTIFYING WEAK ZONES UPON THE STUDY OF ENGINEERING GEOLOGICAL CONDITIONS (BY THE EXAMPLE OF THE BUSHEHR NPP AREA)

V. M. Makeev^{a,#}, A. S. Gusel'tsev^{b,##}, and I. M. Kravchenko^{c,###}

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^b *Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety,
Malaya Krasnoselskaya ul. 2/8, str. 5, Moscow, 107140 Russia*

^c *Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*

[#] *E-mail: vmakeev@mail.ru*

^{##} *E-mail: gouseltsev@secnrs.ru*

^{###} *E-mail: kravchenkoilyamax@yandex.ru*

The article considers the problem of identifying weak zones during engineering-geological research. By the example of studying the engineering-geological conditions in the territory of a particularly dangerous and technologically complicated facility, i.e., the Bushehr Nuclear Power Plant, the necessity is shown to identify and to study weak zones comprehensively, including their origin determination. To achieve these goals, we used the data on the geological structure in the research area obtained from drilling and vertical seismic profiling, as well as the data on the physical-mechanical properties of soils and the results of long-term geodetic observations over deformations of the main buildings of the nuclear power plant complex. It was found that the NPP site including the ground base of the reactor compartment no. 1 is intersected by weak linear zones, the formation of which is associated with buried faults and the technogenic influence on the ground base. It is these zones that were not identified during engineering geological survey and were not taken into account in the design of the nuclear power plant, are the reason for the development of uneven deformations of the ground bases of nuclear power plant buildings. Thus, solving the problems of detection and comprehensive study of weak zones is particularly important to ensure the safe construction and operation of such highly dangerous facilities as nuclear power plants.

Keywords: *weak zones, uneven deformations of ground bases, Bushehr Nuclear Power Plant, deformations of nuclear power plant buildings, vertical seismic profiling*

REFERENCES

1. Viktorov, A.S., Makarov, V.I. *Aerokosmicheskie metody pri reshenii inzhenerno-geologicheskikh problem* [Aero-space methods for solving engineering and geological problems]. *Geoekologiya*, 1999, no. 5, pp. 466–471. (in Russian)
2. Dorozhko, A.L., Makeev, V.M., Batrak, G.I., Pozdnikova, I.A. *Geodinamicheski aktivnye zony i lineamenty i ikh geoekologicheskoe znachenie* [Geodynamically active zones and lineaments in Moscow and their environmental role]. *Geoekologiya*, 2015, no. 2, pp. 173–183. (in Russian)
3. Kuzmin, Yu.O. *Sovremennaya geodinamika razlomnykh zon: razlomoobrazovanie v real'nom masshtabe vremeni* [Recent geodynamics of fault zones: faulting in real time scale]. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2014, no. 5 (2), pp. 401–443.
DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0135. (in Russian)
4. Makarova, N.V., Makeev, V.I., Dorozhko, A.L., Sukhanova, T.V., Korobova, I.V. *Geodinamicheskie sistemy i geodinamicheski aktivnye zony VEP* [East European Craton geodynamic systems and geodynamic active zones]. *Byulleten' of Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody*, 2016, vol. 91, part 4–5, pp. 9–26. (in Russian)
5. Maksimovich, N.G., Khairulina, E.A. *Geokhimicheskie bar'ery i okhrana okruzhayushchei sredy: uchebnoe posobie* [Geochemical barriers and environment protection: study book]. Perm, Perm State University, 2011, 248 p. (in Russian).
6. Marenniy, A.M., Tsapalov, A.A., Miklyaev, P.S., Petrova, T.B. *Zakonomernosti formirovaniya radonovogo polya v geologicheskoi srede* [Regularities of radon field formation in the geological environment]. Moscow, Pero Publ., 2016, 394 p. (in Russian)
7. Nesmeyanov, S.A. *Inzhenernaya geotektonika* [Engineering geotectonics]. Moscow, Nuka Publ., 2012, 560 p. (in Russian)
8. Pashkin, E.M., Pankratov, A.V. Prirodnye attraktory v geoekologii. Stat'ya II. Lineamenty v roli prirodnnykh attraktorov [Natural attractors in geoecology. Article II. Lineaments in the role of natural attractors]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2002, no. 5, pp. 84–95. (in Russian)
9. Pendin, V.V., Fomenko, I.K. *Metodologiya otsenki i prognoza opolznevoi opasnosti* [The landslide hazard assessment and forecast methodology]. Moscow, Lenand Publ., 2015, 320 p. (in Russian)
10. Tregub, A.I. *Razryvnye narusheniya v fundamente i osadochnom chekhle territorii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* [Discontinuous faults in the foundation and sedimentary cover of the Voronezh crystal massif]. *Vestnik VGU. Seriya Geologiya*. 2000, no. 10, pp. 7–15. (in Russian)
11. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Regularities and forecasting of suffosion]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian)
12. Berberian, M. Active faulting and tectonics of Iran: Zagros, Hindu Kush, Himalaya: Geodynamic Evolution. Gupta, H., Delany, F. (eds.). Washington, D.C., American Geophysical Union, 1981, vol. 3, 1981, pp. 33–69. DOI: 10.1029/GD003p0033.
13. Falcon, N.L. Major earth-flexuring in the Zagros mountains of south-west Iran. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1961, vol. 117, pp. 367–376. DOI: 10.1144/gsjgs.117.1.0367.
14. Rumynin, V.G., Nikulenkov, A.M. Geological and physicochemical controls of the spatial distribution of partition coefficients for radionuclides (Sr-90, Cs-137, Co-60, Pu-239,240 and Am-241) at a site of nuclear reactors and radioactive waste disposal (St. Petersburg region, Russian Federation). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 162–163, pp. 205–218. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.05.030.