

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 551.248.2

ОПЫТ СТРУКТУРНО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ В ЦЕЛЯХ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ

© 2023 г. Н. В. Макарова^{1,*}, В. М. Макеев^{2,**}, Т. В. Суханова¹, П. С. Микляев²

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

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: makarovanat@yandex.ru

**E-mail: vmakeev@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

После доработки 10.08.2022 г.

Принята к публикации 16.09.2022 г.

Приводятся результаты геологических и структурно-геодинамических исследований районов размещения некоторых атомных станций, находящихся на Восточно-Европейской платформе. Рассматривается влияние геологического строения, литологии отложений, новейших тектонических движений и созданных ими структур и рельефа, в целом представляющих геологическую среду, на устойчивость территорий атомных станций. Установлено, что основными причинами негативных процессов, связанных с осадками и кренами зданий и сооружений АЭС, являются структурно-геодинамические условия, особенно современные напряжения растяжения, вызывающие повышенные трещиноватость пород и газо-флюидную проницаемость, суффозию, карст и оползание. Этому благоприятствуют тектонические наклоны площадок в сторону опускающихся впадин, песчаные основания площадок, наклон глинистых водопоров, колебания уровней прилежащих водохранилищ, наличие “гидрогеологических окон”, погребенный рельеф и современные структурно-геодинамические условия — тектонические напряжения, во многих случаях напряжения растяжения. Наряду с решением практических задач, затронут ряд теоретических вопросов — сопоставление линейментов с трещиноватостью разновозрастных пород и погребенными разломами фундамента, влияние последних на формирование новейших структур, выделение новых платформенных структур — гравитационно-тектонических массивов и впадин типа пулл-апарт.

Ключевые слова: современная геодинамика, растяжение, источники тектонических напряжений, разрывы, песчано-глинистые отложения, погребенный рельеф, линейменты, трещиноватость, пулл-апарты, экзогенные процессы, суффозия

DOI: 10.31857/S0869780923010071, EDN: HSNIDJ

ВВЕДЕНИЕ

Геологическая устойчивость территории — способность сохранять геологическую, тектоническую, геоморфологическую, гидрогеологическую и др. обстановки при воздействии современных процессов (агентов, факторов) природного (землетрясения, наводнения, опасные экзогенные процессы и др.) и техногенного происхождения (строительство различных объектов, колебания уровней водохранилищ, утечки воды из коммуникаций и др.). Оценка устойчивости — это научное обоснование безопасности территорий размещения особо опасных и технически сложных объектов: реакторных отделений, шахт, глубоких карьеров, высоконапорных плотин, высотных зданий и др. Их безопасность зависит от

разноплановой и разнотипной реакции геологической среды (отклик среды, по Ю.К. Шукину) на воздействие природных и техногенных процессов.

Статья основана на многолетних полевых и камеральных исследованиях, проведенных авторами в последние годы в районах и непосредственно на площадках проектирующихся, строящихся и действующих атомных электростанций (далее АЭС): Нижегородской, Курской 1 и 2, Белорусской, Ростовской и Нововоронежской АЭС-2, а ранее Крымской и Бушерской. Все они находятся в пределах Восточно-Европейской платформы, за исключением Крымской и Бушерской (Иран), что определяет специфику геологического строения территорий — фундамент, находя-

щийся на разной глубине от земной поверхности и перекрывающий его со стратиграфическим перерывом осадочный чехол различной мощности. Наличие в составе чехла песчаных, глинистых и карбонатных пород имеет большое значение для оценки устойчивости сооружений к возможным осадкам и кренам.

Работы проводились с целью выбора площадок под строительство новых АЭС, уточнения тектонических условий и выяснения причин активных геологических процессов на действующих АЭС, в том числе в связи с возведением дополнительных реакторных отделений. Помимо российских АЭС, предварительные геологические и тектонические исследования были проведены в районах проектируемых зарубежных Центров ядерных научных и технологических исследований (ЦИНТ) Боливийского в Южной Америке, Замбийского в Южной Африке и Бангладешского на северо-востоке полуострова Индостан.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные методы исследований:

1. Структурно-геоморфологический, позволивший определить, в пределах каких региональных и локальных новейших структур расположены площадки различных АЭС, а также формы рельефа, являющиеся показателями проявления современных тектонических процессов.

2. Литологический метод включал изучение отложений, являющихся основанием площадок, их вещественного состава, фаций, трещиноватости, определение участков неустойчивого их состояния, способного вызвать развитие и активизацию суффозии, оседания и других процессов.

3. Структурно-кинематический, включающий изучение трещиноватости пород, определение типов трещин, построение стереограмм с показом осей тектонических напряжений и реконструкции полей напряжения.

4. Геохимический, заключающийся в применении радоновой съемки в зонах предполагаемых разрывных нарушений.

5. Структурно-геодинамический, позволяющий на основании результатов, полученных разными методами, определить современные геодинамические условия территорий АЭС и прогнозировать развитие процессов, вызывающих негативные явления на площадках.

Все методы применялись в комплексе с данными бурения, гидрогеологии, геофизики, геодезии с учетом техногенного фактора.

С целью выяснения причин проявления негативных процессов, механизмов их развития и выработки рекомендаций по снижению их негативного влияния на площадку АЭС, структурно-

геодинамические исследования были сгруппированы в три блока [3, 7]. В первом блоке рассматривается геологическое строение, и, в первую очередь, литология отложений площадки АЭС, структурно-геоморфологические и гидрогеологические условия района. Во втором и третьем блоках исследуются неотектоника и геодинамические условия формирования структур. Во всех блоках исследования учитывались основные факторы, влияющие в комплексе или по отдельности на устойчивость территорий к негативным современным геологическим процессам. Исследования проводились в разных масштабах — региональном на территории в радиусе 30–50 км от площадки АЭС, и детальном в радиусе 3–5 км, включающим площадку и ее окрестности. На основе оценки различных факторов была сформулирована “Основа концепции геодинамической безопасности экологически опасных сооружений”.

В целях определения устойчивости сооружений АЭС нами оценены следующие факторы: 1) вещественный состав пород или литология отложений, 2) структурно-геоморфологические условия, 3) гидрогеологические условия и 4) структурно-геодинамические условия. Кроме того, получены данные, имеющие теоретическое значение для новейшей тектоники платформ и, в частности, Восточно-Европейской.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вещественный состав пород или литология отложений

Лессовые образования. Обычно геологические разрезы отложений на территориях АЭС начинаются сверху покровными четвертичными образованиями, в составе которых лессы или лессовидные суглинки, разделенные горизонтами погребенных почв. Их мощность больше на древних высоких геоморфологических поверхностях, минимальны на молодых низких. Лессы и суглинки известковистые, пористые, трещиноватые, что, как известно, вызывает при их намокании образование просадок на поверхности, развитых во всех исследованных районах. Это способствует скоплению поверхностных вод в понижениях, их инфильтрации в подстилающие отложения, особенно в пески, и развитию суффозии. При строительстве котлованов под сооружения и выравнивании площадок покровные образования срезаются, и тогда основанием площадок являются пески разного генезиса, или подстилающие их коренные породы.

Песчаные отложения. Одно из условий при выборе районов для строительства АЭС, помимо безопасности в отношении разломов и сейсмичности, прочности динамических свойств грунтов,

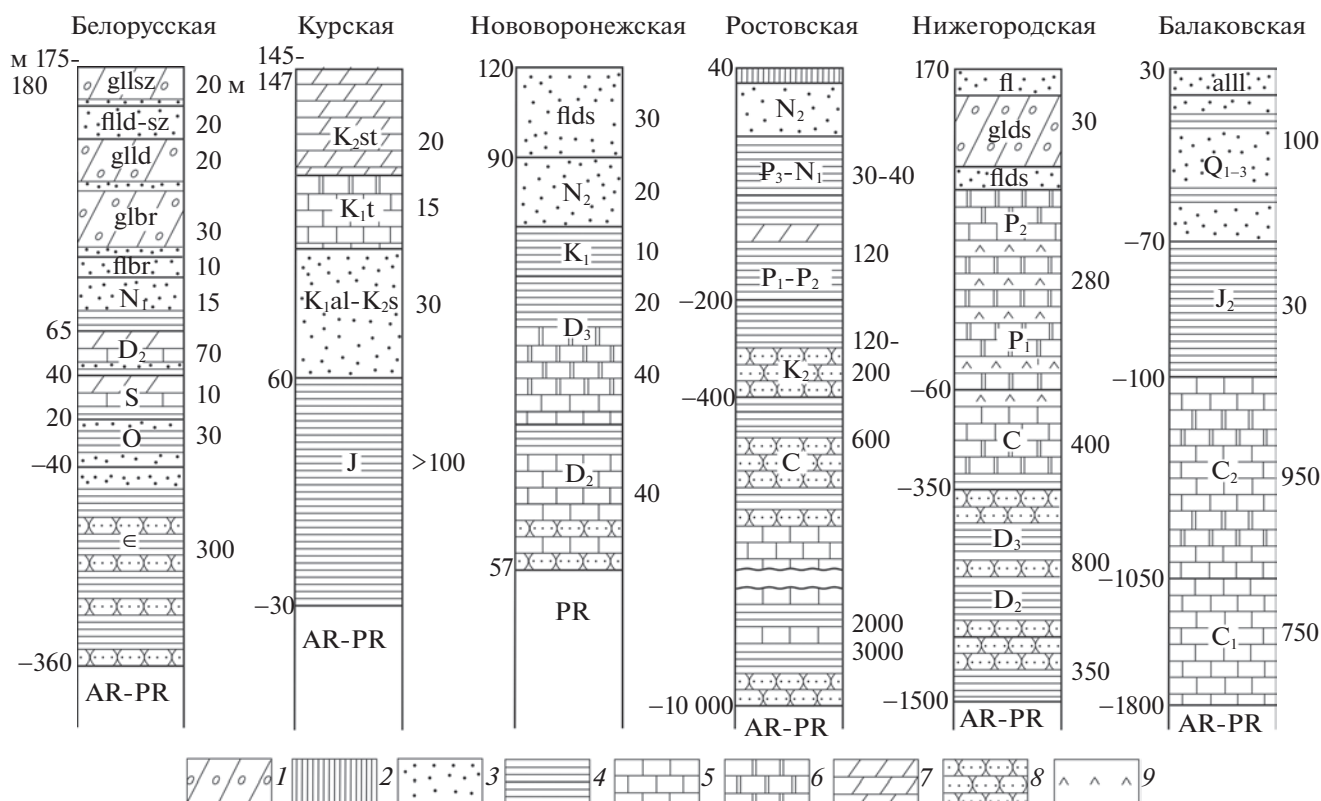


Рис. 1. Схематические разрезы отложений в районах размещения площадок некоторых атомных станций: 1 — ледниковые отложения (морена); 2 — покровные суглинки; 3 — пески, супеси; 4 — глины; 5 — известняки; 6 — доломиты; 7 — мергели; 8 — песчаники; 9 — гипсы, ангидриты. Цифры слева от колонок — гипсометрические отметки кровли слоев (в метрах), справа — мощность слоев (вертикальный масштаб не выдержан). Геологические индексы: морены различного возраста четвертичных оледенений: glds — донского, glld — днепровского, glbr — березинского, gllsz — сожского; флювиогляциальные отложения оледенений: flds — донского, flbr — березинского, flsz — сожского; N₁ — миоцен, N₂ — плиоцен, N₁-P₃ — олигоцен-миоцен, P₁-P₂ — ранний-средний палеоген, K_{2st} — верхний мел сантонский ярус, K₂ — верхний мел, J — юра, P₂ — средняя пермь, D₂ — средний девон, D₃ — верхний девон, S — силур, O — ордовик, ε — кембрий, V — венд, A-PR — архей-протерозой.

служащих основанием зданий и сооружений, — потребность использовать воду для охлаждения реакторов. Поэтому многие АЭС построены в речных долинах (Балаковская, Курская, Воронежская, Чернобыльская, Ровенская и др.), на берегах водохранилищ (Ростовская, Белоярская, Смоленская и др.) или озер (Калининская, Кольская и др.), часто наследующих прогибы. Основными формами рельефа в таких местах являются поймы и террасы рек (и озер), флювиогляциальные долинныя задрры, сложенные обычно песками (рис. 1).

Пески, слагающие грунтовое основание многих площадок АЭС, неоднородны по механическому и фациальному составу, изменяющемуся по латерали и вертикали, что связано с отложением их при разных динамических режимах потоков в различных по размеру руслах, постоянно меняющих свое положение. Большие врезанные палеорусла заполнены крупным песком с гравием и галькой, в меньших по размеру руслах песок средне- и мелкозернистый. Скважины вскрывают па-

леорусла в разных ракурсах — вдоль простираия, тогда в разрезе появляются протяженные горизонтальные слои, или поперек сечений русел, что выражается линзами. Иногда наблюдаются “столбчатые” формы неоднородностей песка, предположительно заполняющие вертикальные трещины. По таким неоднородностям вода может фильтроваться вниз, вынося мелкий материал к подошве песчаной толщи. Среди песков есть прослой тонких осадков — супесей, суглинков, глин пойменных, старичных или озерных фаций. Во всех случаях фильтрационные свойства разных литологических неоднородностей различны.

Глины палеоген-неогеновые на Ростовской, меловые на Курской и Нововоронежской АЭС-2 и др. являются водоупором для подземных вод и вызывают обводнение нижних частей залегающих на них песчаных толщ.

Карбонатные (известняки, доломиты, мергели, мел) или сульфатные (гипсы, ангидриты) породы. Их поверхность обычно трещиноватая, разру-

шенная, с корой выветривания или закарстованная во время продолжительных континентальных перерывов, существовавших до перекрытия их более молодыми отложениями. Так, в разрезе отложений Нововоронежской АЭС-2 верхнедевонские известняки перекрыты нижнемеловыми глинами, а на Нижегородской АЭС на нижнепермских гипсах залегают четвертичные отложения. Местами глинистая покрывка отсутствует, и с карбонатами или сульфатами соприкасаются пески (Нововоронежская АЭС-2). При этом трещиноватость и закарстованность пород ведет к суффозии в перекрывающих их песках, образованию на поверхности просадок, вплоть до воронок [16].

Структурно-геоморфологические условия

Большая часть площадок АЭС в структурном отношении расположена в новейших прогибах, реже на поднятиях, развивающихся в настоящее время. Следствием активных деформаций является активизация различных экзогенных и эндогенных процессов, в том числе интенсивных, часто скрытого характера. Большое значение для их выявления имеет анализ поверхностного и погребенного рельефа на основе полевых наблюдений, бурения и геофизики.

Поверхностный рельеф. Потенциально опасными для развития суффозии на территориях АЭС являются: 1) ложбины, овраги, замкнутые понижения, в том числе на поймах рек, на которых расположены некоторые сооружения станций; 2) основания склонов террас и их тыловые швы, где при выполаживании продольных профилей русел оврагов и ложбин, расчленяющих склоны, или выклинивания грунтовых вод создаются условия для инфильтрации воды вглубь песчаных отложений.

Погребенный рельеф. Негативными для площадок АЭС являются неровности в кровлях пород разного возраста, выявляемые бурением и геофизикой в виде ложбин, русел и долин (коротко палеоврезы). Их образование связывается с континентальными перерывами в развитии территорий в дочетвертичное и четвертичное время. Палеоврезы заполняются осадками водных потоков, имеющими иной механический состав в сравнении с вмещающими породами. Примерами являются различной ширины и глубины ложбины на эрозионных поверхностях карбонатных пород среднего девона и палеорусл плиоценового Дона в поверхностях нижнего мела. Палеоруслы были вскрыты на глубине 45–50 м от земной поверхности под четвертичными отложениями на площадке Нововоронежской АЭС-2 (рис. 2) и на поверхностях верхнеолигоцен-нижнемиоценовых глин на площадке Ростовской АЭС.

Другой пример погребенного эрозионного рельефа — ложбины стока, расчленяющие частично

погребенный склон II позднечетвертичной террасы Дона, на которой расположена площадка Ростовской АЭС. Здесь пойма, I терраса и часть склона II террасы затоплены водами Цимлянского водохранилища. В него по погребенным ложбинам выносятся песчаный материал, что активизирует суффозию в верхней части плиоценовой песчаной толщи, служащей грунтовым основанием площадки АЭС. Это, возможно, является одной из основных причин осадок и кренов некоторых сооружений, находящихся над погребенными ложбинами стока (рис. 3) [6].

Кроме эрозионного рельефа погребенными являются карстовые формы — пустоты, каверны в карбонатных верхнедевонских породах на территории Нововоронежской АЭС-2, или воронки в пермских сульфатных породах на территории проектировавшейся Нижегородской АЭС в низовьях р. Ока и др. В последнем случае ее строительство из-за погребенного и поверхностного карста приостановлено.

Гидрогеологические условия

Пески вмещают грунтовые и более глубокие горизонты подземных вод. На контакте с глинистым водоупором пески водонасыщены, что при наклоне поверхности водоупора (тектоническим или эрозионным) является причиной их сползания. Возможно, это явление происходит в западной части площадки Ростовской АЭС, где смещение поверхностных геодезических реперов к юго-западу совпадает с наклоном в том же направлении водоупора — верхнеолигоцен-нижнемиоценовых глин, перекрытых верхнеплиоценовыми песками.

Часто бывает обводнена не только нижняя часть толщ песков, залегающих на водоупоре, но увлажнены и верхние их части. Это связано с подтоплением песков при подпруживании грунтовых вод ростом молодых поднятий (Курская АЭС-2) [4, 6], сезонным повышением уровня воды в руслах рек (Дон на Нововоронежской АЭС-2), в водохранилищах (Цимлянское на Ростовской АЭС, Саратовское на Балаковской АЭС) и водоохладительных бассейнах для реакторов.

Целостность водоупорного горизонта, разделяющего грунтовые и более глубокие межпластовые воды, бывает тектонически нарушенной вследствие наличия зон повышенной трещиноватости, например, открытого типа. Интенсивный забор вод для питьевых и хозяйственных нужд приводит к возникновению гидрогеологических окон в связи с обменом этих вод и образованию фильтрационных воронок. При техногенных утечках воды и прочих факторах образуются участки с избыточным обводнением в виде куполов растекания. Все эти нарушения приводят к суффозии в песчаной толще (Нововоронежская АЭС-2).

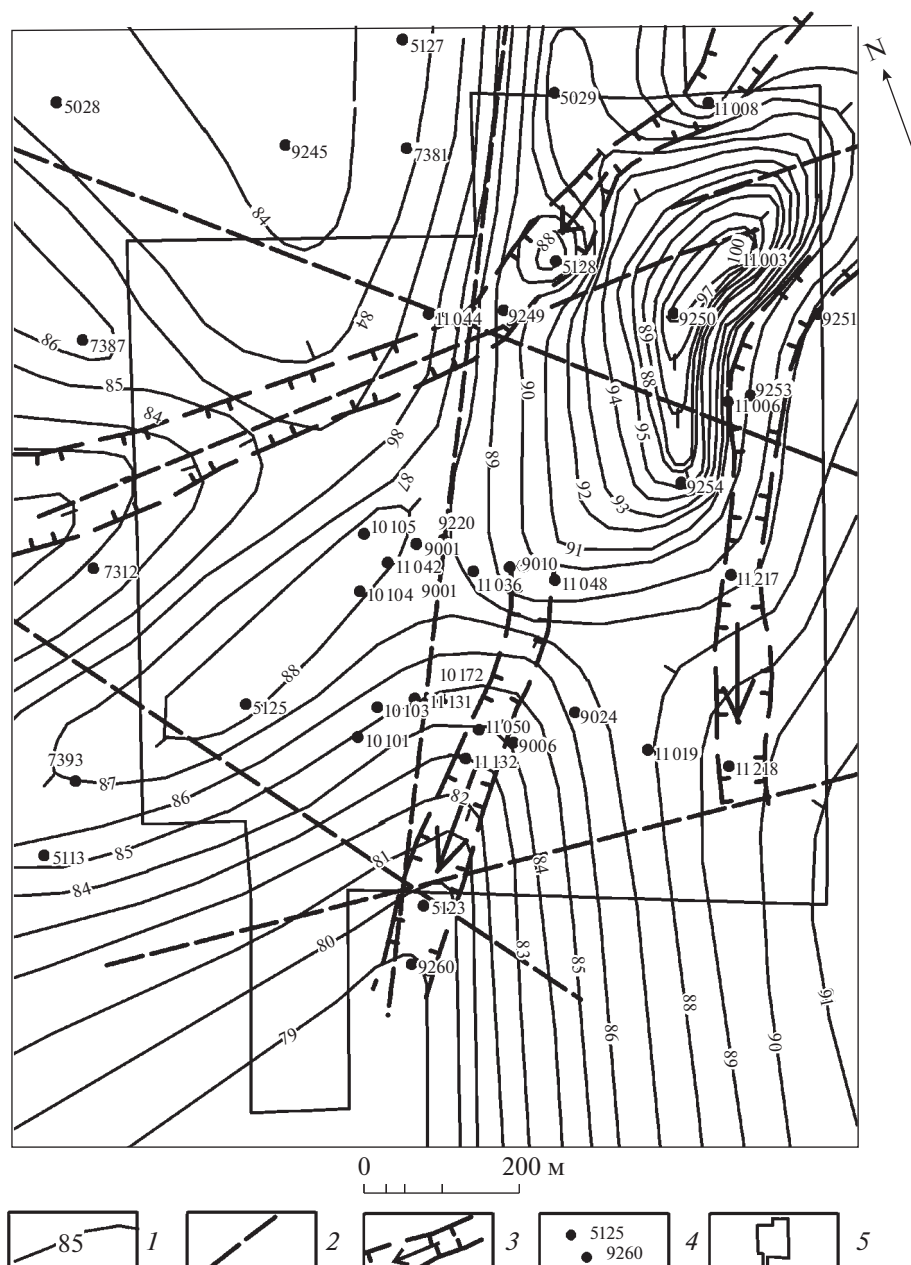


Рис. 2. Палеорула Дона в рельефе кровли плиоценовой кривоборской свиты (aN_2), выделенные по данным бурения, местами совпадающие с линеаментами. 1 – изогипсы кровли поверхности кривоборской свиты; 2 – линеаменты, выделенные на земной поверхности; 3 – погребенные русла и направления их снижения (показаны стрелкой); 4 – номера скважин; 5 – контуры площадки Нововоронежской АЭС-2.

Структурно-геодинамические условия

Геодинамика предполагает выявление источников тектонических напряжений, воздействующих на геологическую среду и вызывающих формирование региональных и локальных тектонических структур (поднятий, опусканий, складчатых и разрывных). Разноранговые структуры, на которых или в пределах которых размещаются различные, в том числе экологически опасные промышленные объекты, развиваются с разными

скоростями. Основанием этих объектов являются древние структуры кристаллического фундамента и чехла, включая разрывные, образованные в доновейшие эпохи активизации тектонических движений, и новейшие структуры, особенно четвертичные. Древние и новейшие структуры часто являются несогласными, образуя структурные планы перекрестного характера, поскольку они формировались в разное время и под действием различных источников напряжений. Такое несо-

гласование структур наблюдается на территориях Курской, Ростовской и др. АЭС [4, 6, 7].

Так, новейшее *субширотное* Сальско-Донское поднятие, в пределах которого находится Ростовская АЭС, и сопряженные с ним Цимлянский и Сальский прогибы, на всем протяжении не согласуются по простиранию с *северо-западным* простиранием структур кристаллического фундамента, находящегося на глубине не более 10 км. Эти поднятия и прогибы также не согласуются по простиранию с палеозойскими структурами вала Карпинского (погребенного продолжения открытых складчатых структур Донбасса), меловыми и палеогеновыми структурами осадочного чехла [13]. Рассматриваемые поднятия и прогибы часто развиваются не конформно над древними синклиналями, антиклиналями и моноклиналями. Лишь иногда наблюдается частичное совпадение структур по знаку движения: молодые поднятия развиты над поднятыми блоками фундамента, образуя штамповые структуры [15] (Курская АЭС), или над сводом или крылом меловой антиклинали (Ростовская АЭС). В целом рассогласованность структур глубинных горизонтов определяет разную их реакцию на неотектонические поля напряжений. Это может вызывать добавочные напряжения сдвигового типа, образование трещиноватости в породах и разрывов, снижение физико-механических свойств грунтов, являющихся основанием площадок.

Современные локальные развивающиеся поднятия и опускания, еще не выраженные в деформациях земной поверхности, часто являются причиной развития негативных процессов: подпруживания стока поверхностных и подземных вод, заболачивания и подтопления территорий, повышенной аккумуляции аллювия в долинах рек, активного развития эрозионных форм и т.д. Все эти явления наблюдаются на территории, прилегающей к площадке Курской АЭС-2.

Современная геодинамика определяет напряженное состояние пород на территориях расположения АЭС: условия сжатия, растяжения, сдвига и др., в которых формируются и развиваются новейшие, в том числе четвертичные структуры. Локальные источники или причины этих напряжений редко кем рассматриваются, тем не менее, они могут негативно сказаться на устойчивости сооружений. Сдвиговые напряжения при горизонтальном растяжении проявляются образованием кулисно расположенных впадин типа пулл-апарт [1, 10] с расширенными поймами и

повышенной мощностью аллювия (территории Нововоронежской, Курской и др. АЭС) (рис. 4). В условиях напряжений растяжения трещиноватость, фиксируемая на поверхности, в том числе выходами родников, аномалиями радона (Курская, Белорусская АЭС), а в погребенных породах геофизическими данными [14] и бурением, становится более открытой и проницаемой для водно-газовых флюидов [11, 12]. Подобного типа трещиноватость проявляется на границах крупных поднятий и впадин. Так, на восточном склоне Воронежского новейшего поднятия в районе Нововоронежской АЭС-2 и южном его склоне в районе Курской АЭС-2 меловые породы интенсивно разбиты системами трещин. Структурно-кинематический (парагенетический) анализ трещин и линеаментов подтвердил активность напряжений растяжения со сдвиговой компонентой. В этих условиях, помимо трещиноватости пород, широко развиты оползни, обвалы, карст, суффозия, восходящие родники, наблюдаемые в районах размещения и непосредственно на площадках АЭС. Кроме того, намечаются крупные массивы дробления и оползания пород гравитационно-тектонического происхождения, которые сопровождаются образованием протяженных трещин будущего отседания (см. рис. 4).

От границ фронта оползания трещины отседания могут отстоять на десятки километров. Примером является массив на правом берегу Дона в районе Нововоронежской АЭС, будущими трещинами отседания которого служат долины рек Девица, Россoshка и др.

Иногда современные геодинамические условия сложны, и их трудно определять. Например, территория размещения Ростовской АЭС, которая находится на Сальско-Донском поднятии. В его формировании участвуют три источника тектонических напряжений: с юга действует давление, наведенное со стороны развивающегося поднятия Кавказа, с севера — давление от вала Карпинского, а с востока — со стороны активного Каспийского прогиба. В результате здесь развиты структуры, в морфологии которых отражены все три источника напряжений, но превалирует давление со стороны Кавказа. Следствием является субширотное простирание основных структур, северо-западная ориентировка локальных структур, а влияние Прикаспия отражено в появлении секущих субмеридиональных структур, прослеживаемых на десятки километров от прогиба.

←

Рис. 3. Карта-схема (А) рельефа площадки Ростовской АЭС, составленная по данным бурения: 1, 2 — поверхности террас Дона: 1 — среднего неоплейстоцена (III и IV террасы нерасчлененные Q_2), 2 — позднего неоплейстоцена (а — II террасы a^2Q_3 , б — затопленной I террасы a^1Q_3); 3 — граница I террасы; 4 — бровка частично погребенного склона II террасы; 5 — граница между II и III террасами; 6 — погребенные ложбины в уступе II террасы с направлением суффозионного выноса; 7 — изогипсы поверхности ергенинской свиты (Neg); 8 — энергоблоки РАЭС. Б — геологический разрез по линии I-I': 1 — пески; 2 — разнородные пески; 3 — направление суффозионных процессов.

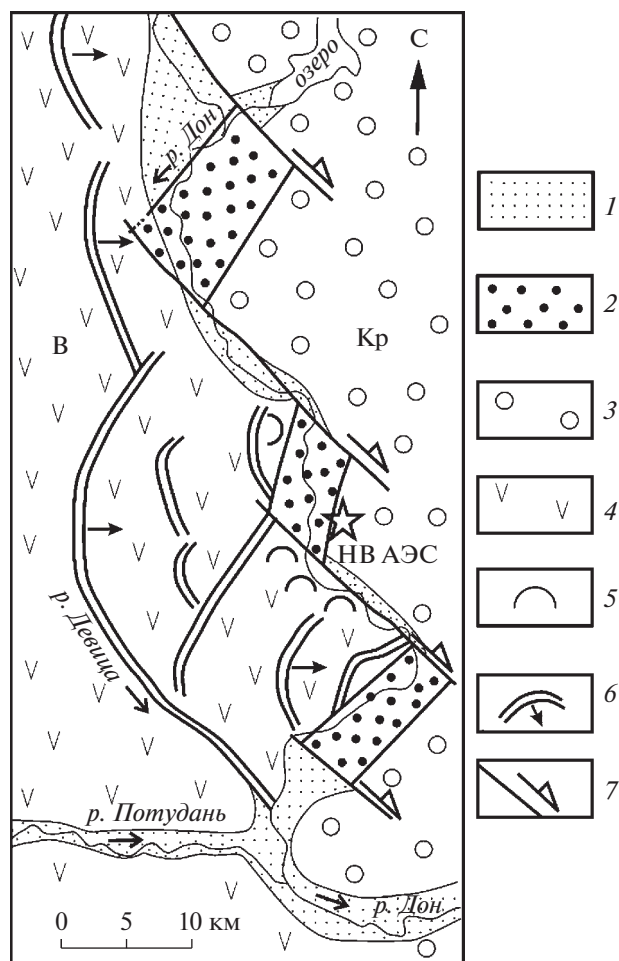


Рис. 4. Строение долины р. Дон в районе Нововоронежской АЭС: 1 – аллювий р. Дон; 2 – расширенные участки долины, интерпретируемые как пулл-апараты; 3 – отложения, слагающие Кривоборский прогиб (Кр); 4 – отложения, слагающие восточное крыло Воронежского поднятия (В); 5 – оползневые склоны; 6 – границы предполагаемых тектоно-гравитационных массивов; 7 – сдвиговые деформации.

Геодинамически-активные зоны (ГДАЗ). Особое значение имеет приуроченность речных долин с расположенными в них АЭС к зонам новейших прогибов (опусканий), являющихся геодинамически активными зонами [2, 5]. Последние разграничивают области, развивающиеся под действием разнотипных напряжений. Некоторые примеры: *Нижнеокский* прогиб (восточнее Москвы) разделяет новейшие поднятия Токмовского свода (на его северном склоне находится территория Нижегородской АЭС) и Окско-Цнинский вал. Субширотное сжатие с запада со стороны расширяющегося Окско-Цнинского вала вместе с давлением с юга со стороны растущего Токмовского свода обуславливает образование зоны левосдвиговых напряжений, наследуемой Нижнеокским прогибом и р. Ока. Влиянием свода объ-

ясняется подворот к югу западных окончаний широтных структур свода. При этом “накачивание” прогиба на структуры сопровождается подмывом Окой высокого правобережья и образованием оползней. Рост поднятий ведет к понижению уровня подземных вод и связанному с этим широкому проявлению карста на территории АЭС.

Кривоборский плиоценовый прогиб (верховье Дона), в западной части которого находится территория Нововоронежской АЭС, разделяет две крупные новейшие, различно развивающиеся структуры – Воронежское поднятие и Окско-Донской прогиб. Последний рассматривается как широкая субмеридиональная протяженная геодинамически активная зона, в которой формируются современные зоны поднятий и прогибов меньшего ранга. Смещение прогиба к западу на склон Воронежского поднятия, происходящее в течение всего новейшего этапа, вызвано ростом на востоке Приволжского поднятия и пододвиганием земной коры прогиба под Воронежское поднятие. В Кривоборском прогибе проявлены условия растяжения с правосдвиговой компонентой, вызывающей образование впадин типа пулл-апарат. Развитие трещин растяжения сопровождается негативной активностью карста, оползней и суффозии. Все эти явления характерны для ближнего района (радиус 30 км) Нововоронежской АЭС.

Амплитуды и скорости развития структур. Амплитуды новейших поднятий на Восточно-Европейской платформе редко превышают 220 м. Поэтому общей закономерностью являются близкие значения скоростей поднятий за весь новейший этап (30–35 млн лет), всего около 0.01 мм/год. Рассчитанные нами скорости за отдельные четвертичные стадии (ранний, средний, поздний неоплейстоцен), продолжительность которых первые сотни-десятки тысяч лет) колеблются от 0.2 до 0.8 мм/год, а в голоцене увеличиваются до 2–4 мм/год. Постоянные детальные геодезические измерения на площадках всех АЭС выявляют современные дифференцированные тектонические движения. Так, вертикальные движения отдельных участков обычно не превышают 1–2 мм/год, составляя ± 0.5 мм/год на Нововоронежской, от ± 0.14 – 0.58 до ± 2.5 – 4.6 мм/год на Ростовской АЭС-2 и др. В то же время под отдельными зданиями и сооружениями или дамбами скорости опускания увеличены до 15–25 мм/год, а иногда и более, что объясняется осадками грунтового основания под объектами. Горизонтальные движения также дифференцированы и вызваны в основном напряжениями растяжения или сжатия вследствие давления со стороны основных региональных источников напряжения или другими причинами. Так, в восточной части площадки Ростовской АЭС отмечается смещение реперов к СВ со скоростью 26 мм/год, а в западной ее части – к ЮЗ со скоростью 16–20 мм/год. В послед-

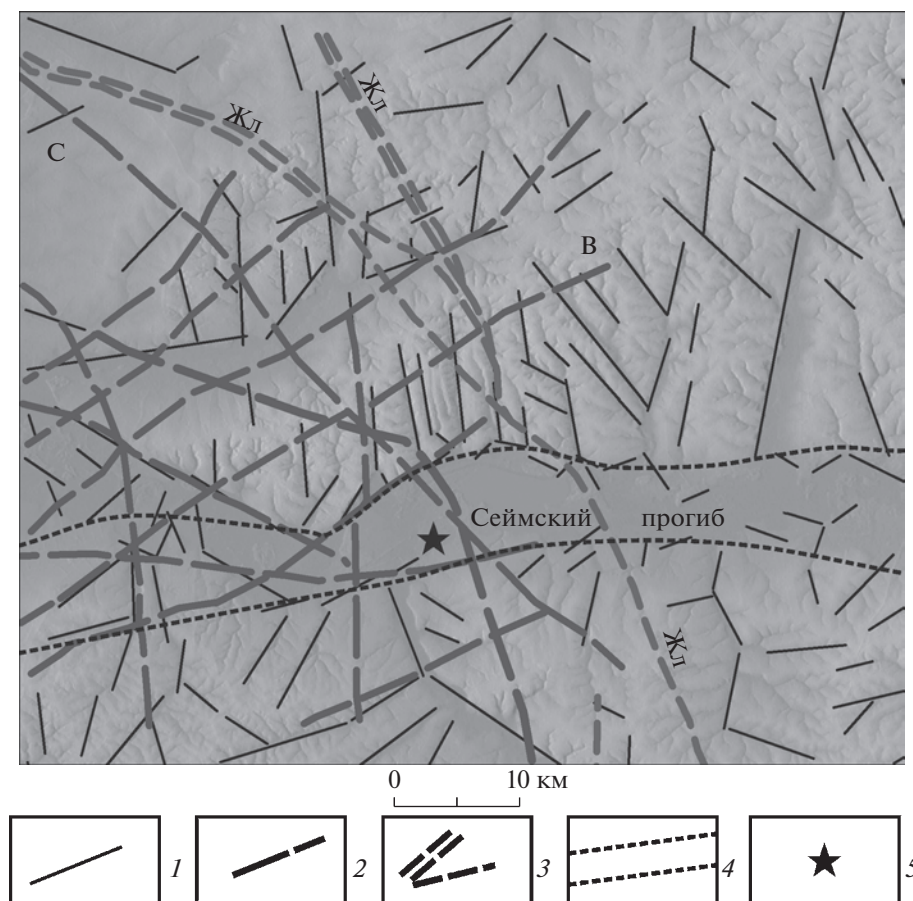


Рис. 5. Соотношение линеаментов и разломов фундамента на южном склоне Воронежского поднятия (В): 1 — линеаменты; 2 — предполагаемые разломы фундамента; 3 — зона Железногорского разлома (Жл); 4 — границы Сеймского прогиба; 5 — площадка Курской АЭС-2.

нем случае это может быть связано с наклоном водоупора — подстилающих олигоцен-миоценовых глин, и деформациями залегающих на них плиоценовых песков, о чем было сказано выше.

Линеаменты, трещиноватость пород и разломы. Линеаменты на территориях АЭС выделяются, как и везде, по данным дешифрирования топографических карт, цифровых моделей рельефа, космо- и аэрофотоснимков. В основном все они выражены различными по протяженности прямолинейными отрезками русел рек и ручьев, ложбин, оврагов, а также различными уступами. На снимках они могут выделяться по градиенту изменения фототона. По установившемуся мнению, линеаменты проявляют трещиноватость пород или более крупные дислокации — погребенные разломы кристаллического фундамента, древние или омоложенные, но редко нарушающие осадочный чехол. Из огромного их числа, образующих “паутину”, простираение некоторых согласно с простираением трещин в разновозрастных породах. При этом наблюдаются близкие направления с трещинами в четвертичных отложениях и лишь частично в древних отложениях —

палеогеновых, меловых, пермских и др. Небольшая часть линеаментов совпадает с палеоруслуями, выделенными бурением на погребенных поверхностях (Белорусская, Курская АЭС-2, Нововоронежская АЭС) [8, 9].

На территории Белорусской АЭС в радиусах 30 и 5 км от площадки непосредственной прямой связи линеаментов с многочисленными разломами фундамента, выделенными в основном по геофизическим данным, не установлено. Многие линеаменты протягиваются далеко от разломов фундамента, а некоторые — только от отдельных участков развиты над ними. В целом из 14 разломов фундамента лишь 4, в основном, северо-западного простираения, отражены в линеаментных.

На южном склоне Воронежского новейшего поднятия, на территории, прилегающей к Курской АЭС, преобладают линеаменты меридионального простираения, тогда как предполагаемые разломы имеют северо-восточное и широтное простираение, а известный древний Железногорский протяженный разлом фундамента, находящегося на глубине менее 200 м, — северо-западное (рис. 5).

На территории Нововоронежской АЭС по геофизическим данным выделены меридиональный и диагональный разломы [14], с которыми можно было бы, предположительно, связать негативные процессы, происходящие на площадке (оседание поверхности, крен некоторых сооружений), не выражены ни в современном, ни в погребенном рельефе, также как и в деформациях отложений. Поэтому их существование нельзя считать доказанным.

ВЫВОДЫ

Полученные данные по исследованию геологического строения и структурно-геодинамических условий районов размещения некоторых АЭС на Восточно-Европейской платформе имеют практическое и теоретическое значение. Проведенный комплекс исследований определил современные источники тектонических напряжений и созданные ими геодинамические условия, в которых находятся эти территории. Это позволяет прогнозировать развитие новейших структур и связанные с этим различные геологические процессы, в том числе негативные.

1. *Практическое значение.* Состав и строение отложений, являющихся основанием площадок АЭС, среди которых преобладают песчаные, карбонатные и глинистые породы, обуславливают развитие негативных процессов, осложняющих эксплуатацию АЭС, особенно в обстановках напряжений растяжения. Это трещиноватость пород, оползание и обваливание, карст, оседание поверхности и др. Неоднородность механического состава песчаных толщ свидетельствует о разветвленных руслах, в которых происходила аккумуляция, некоторые из которых приурочены к зонам трещиноватости. На глинистых водоупорах нижние части песчаных толщ обводнены и при достаточном уклоне поверхности глины могут смещаться, вызывая деформации поверхности. Обводнение песчаных толщ вызывается также подпруживанием стока растущими молодыми поднятиями, еще не выраженными в рельефе. Погребенные ложбины, глубокие врезы, карстовые формы влияют на гидрогеологическую обстановку, обуславливают связь грунтовых и более глубоких вод, способствующую развитию суффозии.

Таким образом, в условиях современных тектонических напряжений растяжения, вызывающих повышенную трещиноватость пород, и при негативных гидрогеологических и геоморфологических условиях, строения поверхностного и особенно погребенного рельефа, а также техногенного фактора (утечки из коммуникаций, размещения водохранилищ и прудов-охладителей) песчаные толщи особенно подвержены процессам суффозии. Этим процессам на территориях

размещения многих АЭС ранее не уделялось достаточного внимания. Именно суффозионная активность в зонах повышенной трещиноватости, а не доказанные разломы, являются одной из причин негативных процессов: оседания поверхности площадок, кренов зданий и сооружений и др.

Наблюдающаяся в настоящее время активность тектонических движений, проявленная в интенсивности эрозионных процессов, росте молодых структур, доказывается увеличением скорости поднятий. В течение отдельных отрезков четвертичного периода она колебалась от 0.2 до 0.8 мм/год, а в настоящее время составляет 2–4 и более мм/год. На фоне увеличивающейся тектонической активности структур геодинамические измерения показывают дифференцированные движения в районах размещения АЭС, в том числе вызванные техногенными причинами.

2. *Теоретическое значение.* Возможность использования комплекса методов — геофизических, геодинамических, бурения, геохимии, наземных исследований и др. — на территориях размещения АЭС позволили затронуть ряд вопросов теоретического характера. К ним относится представление о связи линеаментов с зонами трещиноватости пород и погребенными разломами фундамента. При сопоставлении линеаментов с трещиноватостью разновозрастных пород, чаще наблюдается их связь с трещиноватостью четвертичных отложений и реже с более древними породами. Возможно, это объясняется тем, что линеаменты являются новейшими, а трещиноватость дочетвертичных пород отражает геодинамические обстановки прежнего донеотектонического времени.

Не всегда, как утверждает многими исследователями, линеаменты отражают разломы фундамента, выделенные по геофизическим данным. Примером является южное крыло Воронежской антеклизы, где преобладающие здесь меридиональные линеаменты не согласны по простиранию с СВ и СЗ простираниями древних разломов, в том числе Железнодорожного, пересекающего территорию Курской АЭС. На территории, прилегающей к Белорусской АЭС, из более, чем десяти разломов, выделенных в кристаллическом фундаменте, с линеаментами прямо сопоставляются лишь четыре. Большая часть разломов фундамента не находит отражения в поверхностном и погребенном рельефе и не подтверждается бурением. Субъективизм в выделении линеаментов затрудняет реально оценивать их связь с разломами, а преувеличение роли последних в новейшее время иногда не позволяет видеть другие причины развития негативных процессов.

Меняющиеся на протяжении фанерозоя и, в том числе, на новейшем этапе, геодинамические обстановки, связанные с влиянием различных

источников тектонических напряжений, действующих в разное время, обуславливают образование разноглубинных и разновозрастных структурных планов, часто перекрестных, не согласующихся между собой. Поэтому связь новейших структур со структурами фундамента не всегда подтверждается. Одним из примеров этого является территория размещения Ростовской АЭС, где структуры фундамента, палеозойские, мезозойские и новейшие не согласуются между собой.

Исследования на территориях, прилежащих к АЭС, позволили выделить новые для Восточно-Европейской платформы структуры и подтвердить существование ранее выделенных структур. К новым структурам относятся крупные гравитационно-тектонические массивы, образованные в условиях напряжений растяжения на границах некоторых платформенных поднятий и опусканий. Это массивы потенциального будущего дробления пород и их сползания или обрушения в прилегающий прогиб. В тыловой части они ограничены, как и современные оползни, циркулярными формами, а также линейными долинами или только намечающимися понижениями — будущими трещинами отседания. Последние выделяются на расстоянии десятков километров от границы с прогибами.

Условия растяжения со сдвиговой компонентой приводят к образованию в долинах рек локальных впадин типа пулл-апарт, ранее (за исключением отдельных исследований) не выделявшихся на Восточно-Европейской платформе. Для них характерны кулисное сочленение, расширенная пойма, повышенная мощность аллювия.

Рассмотренные выше проблемы выделения линеаментов, разломов, трещиноватости пород, новейших структур и их соотношения с древними, донеотектоническими дислокациями требуют дальнейшего изучения с привлечением всех методов, особенно бурения и геофизики.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГЭ РАН по теме НИР № 122022400105-9 “Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Копп М.Л.* Дугообразные структуры растяжения в кинематике региональных и глобальных тектонических обстановок // *Геотектоника*. 2017. № 5. С. 18–36.
2. *Макаров В.И., Дорожко А.Л., Макарова Н.В., Макеев В.М.* Современные геодинамически активные зоны платформ // *Геоэкология*. 2007. № 2. С. 99–110.
3. *Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Дорожко А.Л., Микляев П.С., Коробова И.В.* Новейшая тектоника и геодинамика Нижнеокского региона (Русская плита) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. 2012. № 4. С. 4–11.
4. *Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Дорожко А.Л., Коробова И.В., Карфидова Е.А.* Новейшая тектоника и геодинамика юго-западного крыла Воронежской антеклизы // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология*. 2015. № 1. С. 10–19.
5. *Макарова Н.В., Макеев В.М., Дорожко А.Л., Суханова Т.В., Коробова И.В.* Геодинамические системы и геодинамически активные зоны Восточно-Европейской платформы // *Бюл. МОИП. Отд. геол.* 2016. Т. 91. Вып. 4–5. С. 9–26.
6. *Макарова Н.В., Макеев В.М., Суханова Т.В., Гусельцев А.С.* Геологические условия развития суффозионных процессов и их современная активизация на Сальско-Донском поднятии (район Ростовской АЭС) // *Геоэкология*. 2019. № 6. С. 19–29.
7. *Макеев В.М.* Структурно-геодинамические условия устойчивости особо опасных и технически сложных объектов на древних платформах: автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук: М.: ООО “Ай-клуб”, 2015. 50 с.
8. *Макеев В.М., Макарова Н.В., Суханова Т.В., Дорожко А.Л., Коробова И.В.* Структурно-геоморфологическая характеристика и четвертичные отложения Островецкого района (Беларусь) // *Сб. статей VIII Всерос. совещ. по изуч. четвертичн. периода*. Ростов-на-Дону. Изд. ЮНЦ РАН. 2013. С. 404–406.
9. *Макеев В.М., Макарова Н.В., Суханова Т.В.* Структурно-геоморфологические и геодинамические условия территории размещения Нововоронежской АЭС-2 // *XXII Всерос. с межд. участием научно-практ. Шукинская конф.* Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2020. С. 215–218.
10. *Макеев В.М., Макарова Н.В., Суханова Т.В.* Современная геодинамика и неотектоника центральной части Русской равнины // *Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики: матер. ЛП Тектонического сов.* М.: ГЕОС, 2020. Т. 2. С. 67–72.
11. *Маренный А.М., Цапалов А.А., Микляев П.С., Петрова Т.Б.* Закономерности формирования радонового поля в геологической среде. М.: Изд-во “Перо”, 2016. 394 с.
12. *Микляев П.С., Маренный А.М., Цапалов А.А., Петрова Т.Б.* Комплексные мониторинговые исследования радонового поля грунтовых массивов. Основные результаты // *АНРИ*. 2017 № 4 (91). С. 2–22.
13. *Новейшая тектоника и геодинамика: обл. сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты* / Отв. ред. Ю.К. Шукин. М.: Наука, 2006. 206 с.
14. *Спунгин В.Г., Бурчик В.А., Скворцов А.Г.* Сейсмические сигналы в пределах площадки НВ АЭС-2 и их связь с особенностями строения геологической среды // *Структура, свойства, динамика и минерализация литосферы Восточно-Европейской платформы*. Воронеж: Научная кн., 2010. Т. 2. С. 245–250.
15. *Трегуб А.И.* Неотектоника территории Воронежского кристаллического массива // *Тр. НИИ Геол.* Воронеж. ун-та. 2002. Вып. 9. 220 с.
16. *Хоменко В.П.* Закономерности и прогноз суффозионных процессов. М.: ГЕОС, 2003. 216 с.

EXPERIENCE IN GEOSTRUCTURAL AND GEODYNAMIC INVESTIGATIONS OF NUCLEAR POWER PLANT ALLOCATION TERRITORIES FOR ASSESSING STABILITY OF ENGINEERING STRUCTURES

N. V. Makarova^{a,*}, V. M. Makeev^{b,**}, T. V. Sukhanova^a, and P. S. Miklyaev^b

^a Lomonosov Moscow State University,
Leninskiye Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

^b Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia.

*E-mail: makarovnat@yandex.ru

**E-mail: vmakeev@mail.ru

The results of geological and structural-geodynamic research are presented for the territories of several nuclear power plants (NPP) located on the East European Platform. The influence of geological structure, lithology, and the latest tectonic movements are considered as well as the resultant structures and relief, which generally represent the geological environment, on the stability of the NPP areas. Structural and geodynamic conditions, in particular, recent tensile stresses that cause intense rock fracturing and high gas-fluid permeability, suffusion, karst and landslide, are proved to be the main causes of hazardous processes resulting in settling and tilting of some NPP buildings. Tectonic sloping of the sites towards descending depressions, the sand basement of NPP sites, sloping clay aquicludes, fluctuating water levels in the adjacent water reservoirs, the presence of so-called “hydrogeological windows”, the buried relief and modern structural and geodynamic conditions, i.e., tectonic stresses (tensile stresses in many cases) contribute to building deformations. Along with solving practical problems, a number of theoretical issues are considered. Lineaments are associated with rock fracture zones and faults zones; the fault zones in crystalline foundation influence the formation of recent structures; and new platform structures, i.e. gravity-tectonic massifs and pull-apart depressions, are distinguished.

Keywords: recent geodynamics, extension, tectonic stress sources, faults, sandy-clay deposits, buried relief, lineaments, fracture, pull-aparts, exogenous processes, suffusion

REFERENCES

1. Kopp, M.L. *Dugoobraznye struktury rastyazheniya v kinematike regional'nykh i global'nykh tektonicheskikh obstanovok* [Arcuate extension structures in the kinematics of regional and global tectonic settings]. *Geotectonika*, 2017, no. 5, pp. 18–36. (in Russian)
2. Makarov, V.I., Dorozhko, A.L., Makarova, N.V., Makeev, V.M. *Sovremennye geodinamicheski aktivnye zony platform* [Modern geodynamically active zones of platforms]. *Geoekologiya*, 2007, no. 2, pp. 99–110. (in Russian)
3. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Sukhanova, T.V., Dorozhko, A.L., Miklyaev, P.S., Korobova, I.V. *Noveishaya tektonika i geodinamika Nizhneokskogo regiona (Russkaya plita)* [Recent tectonics and geodynamics of the Nizhneoksky region (the Russian Plate)]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 4. Geologiya*, 2012, no. 4, pp. 4–11. (in Russian)
4. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Sukhanova, T.V., Dorozhko, A.L., Korobova, I.V., Karfidova, E.A. *Noveishaya tektonika i geodinamika yugo-zapadnogo kryla Voronezhskoi anteklizy* [Recent tectonics and geodynamics of the southwestern flank of the Voronezh antecline]. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Ser. 4. Geologiya*, 2015, no. 1, pp. 10–19. (in Russian)
5. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Dorozhko, A.L., Sukhanova, T.V., Korobova, I.V. *Geodinamicheskie sistemy i geodinamicheski aktivnye zony Vostochno-Evropeiskoi platformy* [Geodynamic systems and geodynamically active zones of the East European Platform]. *Byul. MOIP. Otd. Geol.*, 2016, vol. 91, no. 4–5, pp. 9–26. (in Russian)
6. Makarova, N.V., Makeev, V.M., Sukhanova, T.V., Gusevtsev, A.S. *Geologicheskie usloviya razvitiya suffuzionnykh protsessov i ikh sovremennaya aktivizatsiya na Sal'sko-Donskom podnyatii (rayon Rostovskoi AES)* [Geological conditions for the development of suffusion processes and their modern activation on the Salsko-Don uplift (the area of the Rostov NPP)]. *Geoekologiya*, 2019, no. 6, pp. 19–29. (in Russian)
7. Makeev, V.M. *Strukturno-geodinamicheskie usloviya ustoychivosti osobo opasnykh i tekhnicheskikh slozhnykh ob'ektov na drevnikh platformakh: avtoref. dis. dokt. geol.-min. nauk.* [Structural and geodynamic conditions for the stability of especially dangerous and technically complex objects on ancient platforms]. Extended Abstract Doctoral Sci. (Geol.-Min.) Dissertation, Moscow, I-Club Publ., 2015. 50 p. (in Russian)
8. Makeev, V.M., Makarova, N.V., Sukhanova, T.V., Dorozhko, A.L., Korobova, I.V. *Strukturno-geomorfologicheskaya kharakteristika i chetvertichnye otlozheniya Ostrovetskogo raiona (Belarus')* [Structural-geomorphological characteristics and Quaternary deposits of the Ostrovets region (Belarus)]. Proc. VIII All-Russia Workshop on the study of Quaternary period. Rostov-on-Don, YuNTs RAN Publ., 2013, pp. 404–406. (in Russian)
9. Makeev, V.M., Makarova, N.V., Sukhanova, T.V. *Strukturno-geomorfologicheskaya kharakteristika i chetvertichnye otlozheniya Ostrovetskogo raiona (Belarus')* [Structural-geomorphological characteristics and Quaternary deposits of the Ostrovets region (Belarus)]. Proc. VIII All-Russia Workshop on the study of Quaternary period. Rostov-on-Don, YuNTs RAN Publ., 2013, pp. 404–406. (in Russian)

- territorii razmeshcheniya Novovoronezhskoi AES-2* [Structural-geomorphological and geodynamic conditions of the Novovoronezh NPP-2 location territory]. Proc. XXII All-Russia Shchukin Sci. and Pract. Conference with international participation. Voronezh, VSU Publ., 2020, pp. 215–218. (in Russian)
10. Makeev, V.M., Makarova, N.V., Sukhanova, T.V. *Sovremennaya geodinamika i neotektonika tsentral'noi chasti Russkoi ravniny* [Resent geodynamics and neotectonics of the central part of the Russian Plain]. Proc. LII Tectonic Workshop on Fundamental problems in tectonics and geodynamics. Moscow, GEOS Publ., 2020, vol. 2, pp. 67–72. (in Russian)
11. Marennyi, A.M., Tsapalov, A.A., Miklyaev, P.S., Petrova, T.B. *Zakonomernosti formirovaniya radonovogo polya v geologicheskoi srede* [Patterns of the formation of radon field in the geological environment]. Moscow, Pero Publ., 2016, 394 p. (in Russian)
12. Miklyaev, P.S., Marennyi, A.M., Tsapalov, A.A., Petrova, T.B. *Kompleksnye monitoringovye issledovaniya radonovogo polya gruntovykh massivov. Osnovnyye rezul'taty* [Complex monitoring studies of the radon field of soil massifs. Main results]. *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii*, 2017, no. 4 (91), pp. 2–22. (in Russian)
13. *Noveishaya tektonika i geodinamika: oblast' sochleneniya Vostochno-Evropeiskoi platformy i Skifskoi plity* [The recent tectonics and geodynamics: the joint area between the East Europe Platform and the Scythian plate]. Yu.K. Shchukin, Ed., Moscow, Nauka Publ., 2006, 206 p. (in Russian)
14. Spungin, V.G., Burchik, V.A., Skvortsov, A.G. *Seismicheskie signaly v predelakh ploshchadki NV AES-2 i ikh svyaz' s osobennostyami stroeniya geologicheskoi sredy* [Seismic signals within the NV NPP-2 site and their connection with the structural features of the geological environment]. *Struktura, svoistva, dinamika i minerageniya litosfery Vostochno-Evropeiskoi platform* [Structure, properties, dynamics and minerageny of the lithosphere in the East European Platform]. Voronezh, Nauchnaya Kniga Publ., 2010, vol. 2, pp. 245–250. (in Russian)
15. Tregub, A.I. *Neotektonika territorii Voronezhskogo kristallicheskogo massiva* [Neotectonics of the Voronezh crystalline massif territory]. Voronezh, Nauchnaya Kniga Publ., 2002, issue 9, 220 p. (in Russian)
16. Khomenko, V.P. *Zakonomernosti i prognoz suffuzionnykh protsessov* [Patterns and forecast of suffusion processes]. Moscow, GEOS Publ., 2003, 216 p. (in Russian).