

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2025, Том 17, № 1 / 2025, Vol. 17, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2025.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/18NZVN125.pdf>

DOI: 10.15862/18NZVN125 (<https://doi.org/10.15862/18NZVN125>)

1.6.21. Геоэкология (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Субботин, Д. А. Методика изучения трансформации свойств грунтов оснований в процессе строительства и эксплуатации ответственных сооружений АЭС / Д. А. Субботин, П. И. Кашперюк, В. А. Курочкина // Вестник евразийской науки. — 2025. — Т. 17. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/18NZVN125.pdf>
DOI: 10.15862/18NZVN125

For citation:

Subbotin D.A., Kashperyuk P.I., Kurochkina V.A. Methodology for studying the transformation of the properties of the soils of the foundations during the construction and operation of critical NPP facilities. *The Eurasian Scientific Journal*. 2025;17(1): 18NZVN125. Available at: <https://esj.today/PDF/18NZVN125.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)
DOI: 10.15862/18NZVN125

УДК 624.131.3

Субботин Дмитрий Александрович

ГК «Мосинжпроект», Москва, Россия
ООО «МИП-Строй № 1»
Главный специалист
E-mail: Subbotin.DA@mosinzhpoeekt.ru

Кашперюк Павел Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
Доцент
Кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: npf-sivs@yandex.ru

Курочкина Валентина Александровна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
Доцент
Кандидат технических наук
E-mail: Kurochkina@mgsu.ru

Методика изучения трансформации свойств грунтов оснований в процессе строительства и эксплуатации ответственных сооружений АЭС

Аннотация. В статье рассмотрены актуальные проблемы инженерно-геологических, геоэкологических и геотехнических исследований грунтов оснований наиболее ответственных сооружений атомных электростанций для разработки обоснования возможности их эксплуатации на дальнейший сверхнормативный срок в современных, фактически сформировавшихся, геоэкологических условиях. Обосновывается необходимость разработки специальных методов анализа и обработки информации, полученной на начальном (проектном) и конечном (эксплуатационном) этапах жизненного цикла таких сооружений, позволяющих на основании ретроспективного анализа и выявления динамики изменения свойств грунтов основания ответственных сооружений решать прогнозные задачи по возможности безопасной эксплуатации таких крупных промышленных объектов на дальнейший сверхнормативный

срок. Предлагается оригинальная методика анализа и интерпретации материалов инженерно-геологических изысканий, разделенных по срокам исполнения несколькими десятилетиями для исследования трансформации основных физико-механических свойств грунтов практически за полный жизненный цикл сооружения и установления направленного, необратимого и закономерного их развития в условиях интенсивного техногенного воздействия на территориях современных атомных электростанций. Приведены результаты анализа трансформации отдельных свойств грунтов основания сооружений реакторных отделений, характеризующие изменения параметров этих свойств в пространстве и времени. Применение разработанной методики исследований позволяет осуществить прогноз динамики и величины изменения основных физических свойств глинистых грунтов основания и их дальнейшей сжимаемости на ближайшие 5, 10 и 30 лет работы сооружения атомной электростанции.

Ключевые слова: грунты основания; трансформация свойств грунтов; методика исследований; анализ и обработка материалов изысканий; прогноз; ретроспективные построения; инженерно-геологические условия; геоэкологические условия

Введение

Атомные электростанции (АЭС) как важнейший промышленный комплекс выступают потенциальным источником повышенного риска экологической, ядерной, радиационной, технической и пожарной опасности для природной среды и биосферы. Исходя из технико-экономических показателей в последние годы идет активное обсуждение возможности продления службы сооружений АЭС, построенных в 70–80-х годах в нашей стране. Эксплуатация ответственных сооружений на период дополнительного срока требует детального обоснования возможности безопасной эксплуатации основных зданий и сооружений, в частности радиационных отделений. На таких крупных объектах происходит интенсивное техногенное изменение геологической среды, активизируются природные и формируются новые инженерно-геологические процессы [1–3]. Таким образом важнейшей составляющей прогноза устойчивости сооружений АЭС во времени является подтверждение требуемых показателей прочностных и деформационных свойств и стабильности состояния грунтов активной зоны оснований ответственных зданий и сооружений в целом, что отражено в документах Ростехнадзора (РД 06-565-03 Методические указания о порядке продления срока службы технических устройств, зданий и сооружений с истекшим нормативным сроком эксплуатации, в горнорудной промышленности) и Федеральной службы по атомному надзору (СП 151.13330.2012 Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС). Здесь оценка инженерно-геологических и геоэкологических условий не может ограничиваться стандартной программой изысканий. Для оценки взаимодействия строительных объектов и компонента природной среды, в частности литосферы, необходимо выполнение инженерно-геологических изысканий в составе и объеме с учетом вида, назначения, конструктивных особенностей, технической сложности, практической доступности к точкам исследования, потенциальной опасности и степени изученности условий территории за период проектирования, строительства и эксплуатации строительного объекта (ПиНАЭ-5.10-87 Основания реакторных отделений атомных станций). Рассмотрение вопросов трансформации свойств грунтов основания ответственных или уникальных зданий и сооружений в процессе их строительства и длительной эксплуатации невозможно без разработки методики инженерно-геологических и геоэкологических исследований, основанной на особенностях эволюционного подхода к решению ретроспективных и прогнозных задач региональной инженерной геологии, в том числе на конкретных участках застраиваемой территории. Крайняя ограниченность научных публикаций методического характера по инженерно-геологическим изысканиям на территории АЭС, по-видимому, связана с трудностью доступа исследователей к материалам

инженерных изысканий таких объектов (засекреченностью материалов) и небольшим сроком (10–15 лет) после возникновения проблемы возможности продления срока дальнейшей эксплуатации наиболее ответственных сооружений АЭС.

Однако, системный анализ обширного массива материалов инженерно-геологических изысканий, режимных наблюдений, результатов мониторинга за осадками зданий невозможен без разработки и применения соответствующей методики исследования. В связи с этим целью настоящей работы является разработка методики специальных инженерных изысканий для оценки сформировавшихся геоэкологических условий на территории АЭС. Для ее достижения на первом этапе работы, связанным с оценкой и анализом изменения инженерно-геологических условий на территории АЭС необходима разработка методика изучения трансформации свойств грунтов оснований в процессе строительства и эксплуатации сооружений атомной электростанции.

При изучении пространственной изменчивости инженерно-геологических условий, разработке оценочных критериев в прогнозных построениях динамики развития и формирования этих условий применительно к обоснованию возможности безаварийной эксплуатации наиболее ответственных сооружений энергогенерирующих объектов нами использовались методы сравнительно-геологического анализа, регионального инженерно-геологического прогнозирования (математический) и геотехнического (в большей части геодезического) мониторинга, разработка которых изложена в работах Г.К. Бондарика, В.Т. Трофимова, и других [1; 2; 4–7].

Методика изучения трансформации свойств грунтов оснований в процессе строительства и эксплуатации ответственных сооружений АЭС

Решая конкретную задачу по обоснованию возможности безопасной эксплуатации энергоблоков № 1 и № 2 Калининской АЭС в период дополнительного срока эксплуатации нами был проведен комплекс инженерно-геологических изысканий по специально разработанной программе, согласованной с соответствующими подразделениями Госкорпорации «Росатом» и руководством Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская атомная станция».

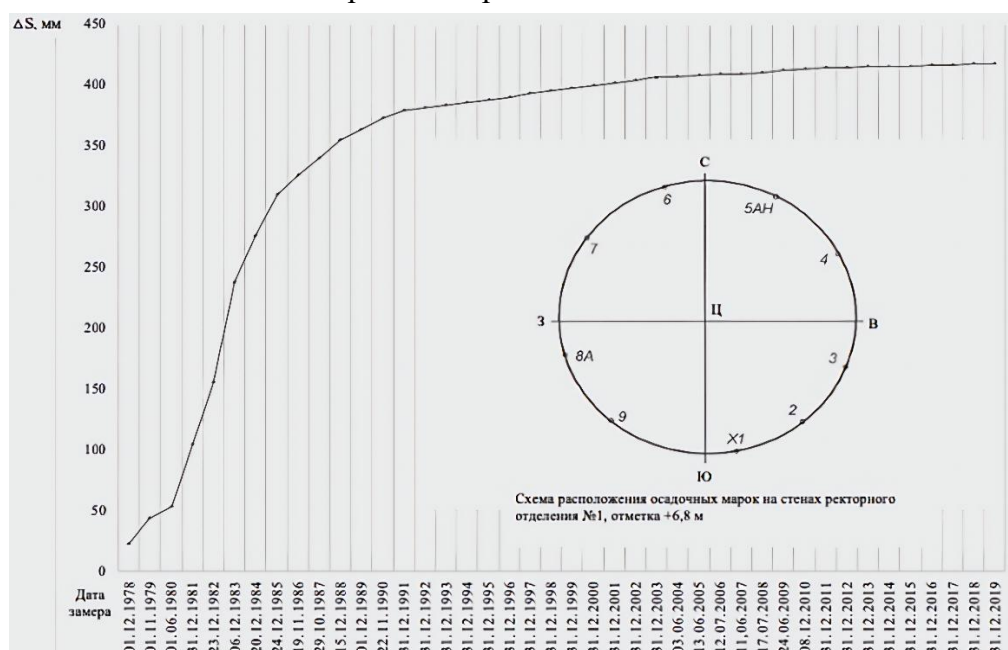


Рисунок 1. График ежегодного приращения средних расчетных осадок центра фундаментной плиты за весь период геодезического мониторинга здания РО-1 с 1977 по 2019 годы (разработано авторами)

Полевые и лабораторные работы в процессе изысканий выполнялись с использованием стандартных и новых, предложенных авторами, нестандартных методик исследования качественных и количественных характеристик изучаемых компонент геоэкологических условий территории АЭС. Для анализа изменений основных свойств грунтов основания и прогноза возможности их дальнейшей трансформации, включая изменения величин осадок грунтов основания, на последующие 5, 10, 30 лет были привлечены материалы выполненных нами в 2019 году инженерно-геологических изысканий, архивные материалы инженерно-геологических изысканий, выполненных в 1972–1980 годах на стадии проектирования; материалы многолетнего ежемесячного геодезического мониторинга за осадками фундаментной плиты с апреля 1977 года (РО-1) и с января 1982 года (РО-2). Схема расположения девяти осадочных марок на стенах в реакторном отделении № 1 приведена на рисунке 1.

Наличие данных систематического мониторинга за осадками фундаментной плиты за большой срок строительства и за весь период эксплуатации сооружений реакторных отделений (РО-1 и РО-2) позволяет судить о характере (динамике) и величине суммарной деформации толщи грунтов активной зоны основания сооружений [2; 8]. Материалы геодезического мониторинга за фактическими осадками по периметру фундаментной плиты позволяют построить график изменения (приращения) расчетных величин осадок в центре фундаментной плиты [9; 10]. Такой график по расчетным осадкам центра фундаментной плиты за весь период строительства и эксплуатации РО-1 (42 года) приведен на рисунке 1.

Кривая изменения суммарной осадки центра фундаментной плиты во времени соответствует характеру уплотнения и, соответственно, изменению величин (параметров) основных физико-механических свойств грунтов основания сооружения, в нашем случае толщи глинистых грунтов (суглинков и глин) валдайского и московского оледенений. Для примера на рисунках 2, 3 и 4 приведены графики изменения плотности, коэффициента пористости и модуля общей деформации глины валдайской морены, являющейся непосредственным основанием РО-1, не считая подушку из щебня.

Плотность глины валдайской морены за 10 лет строительства и 32 года эксплуатации объекта изменилась на $0,04 \text{ г/см}^3$ с $2,04 \text{ г/см}^3$ (по материалам архивных данных 1972 года) до $2,08 \text{ г/см}^3$ (по материалам изысканий 2019 г.). Коэффициент пористости этого грунта изменился с значения 0,631 до 0,608. Модуль общей деформации валдайских глин по результатам компрессионных испытаний в 1972 году в диапазоне нагрузок $3\text{--}5 \text{ кг/см}^2$ и современных трехосных испытаний практически не изменился и составил 20 МПа и 21 МПа соответственно.

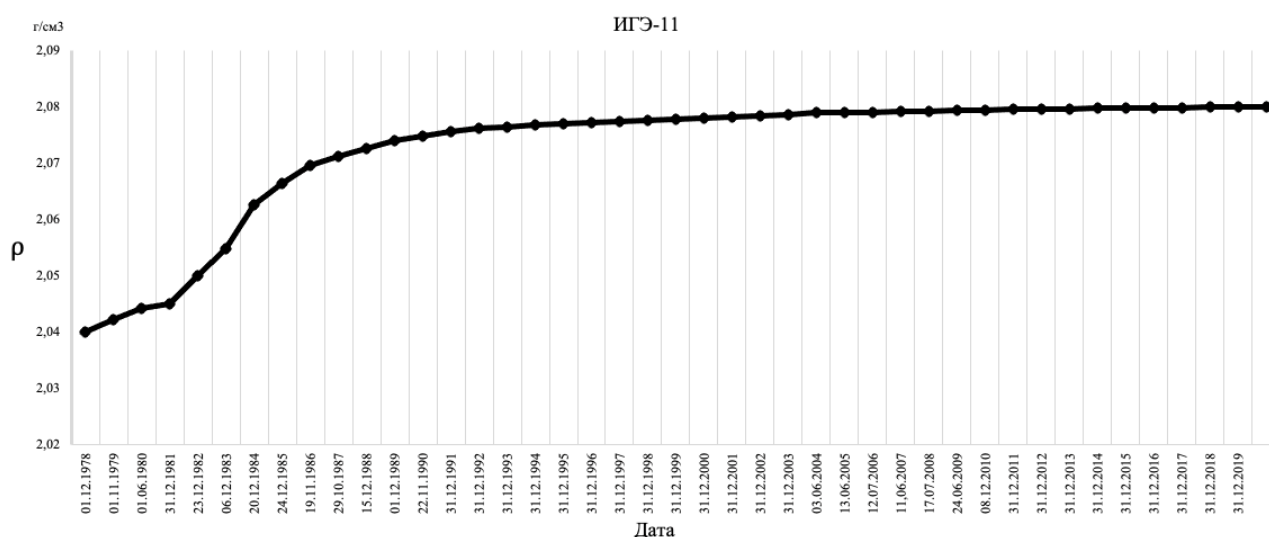


Рисунок 2. Характер и динамика изменения плотности глины валдайского оледенения за период строительства и эксплуатации АЭС (разработано авторами)

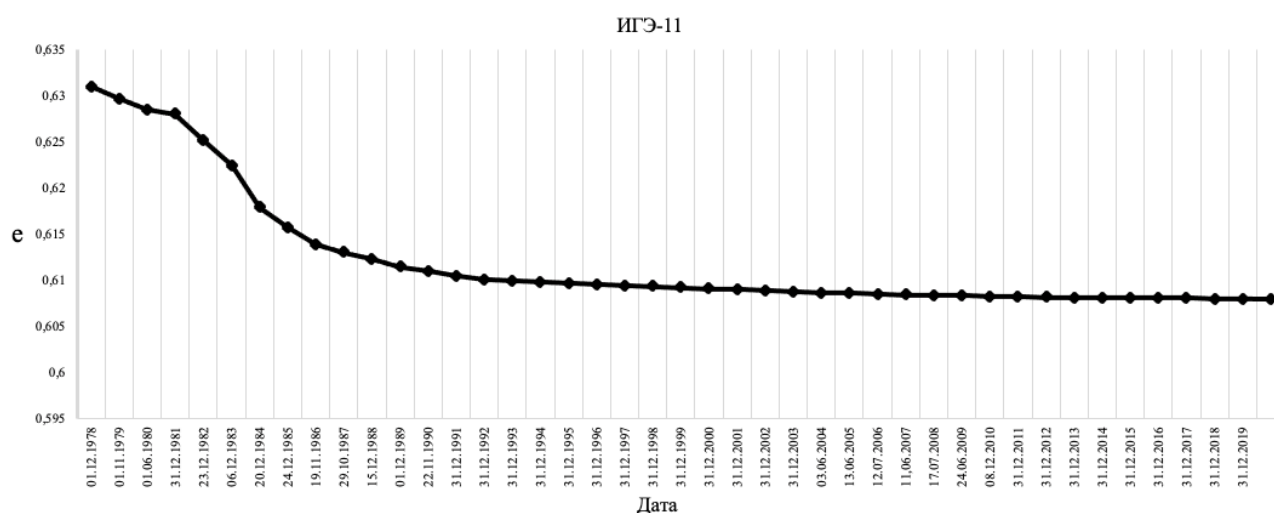


Рисунок 3. Характер и динамика изменения коэффициента пористости глины валдайского оледенения за период строительства и эксплуатации АЭС (разработано авторами)

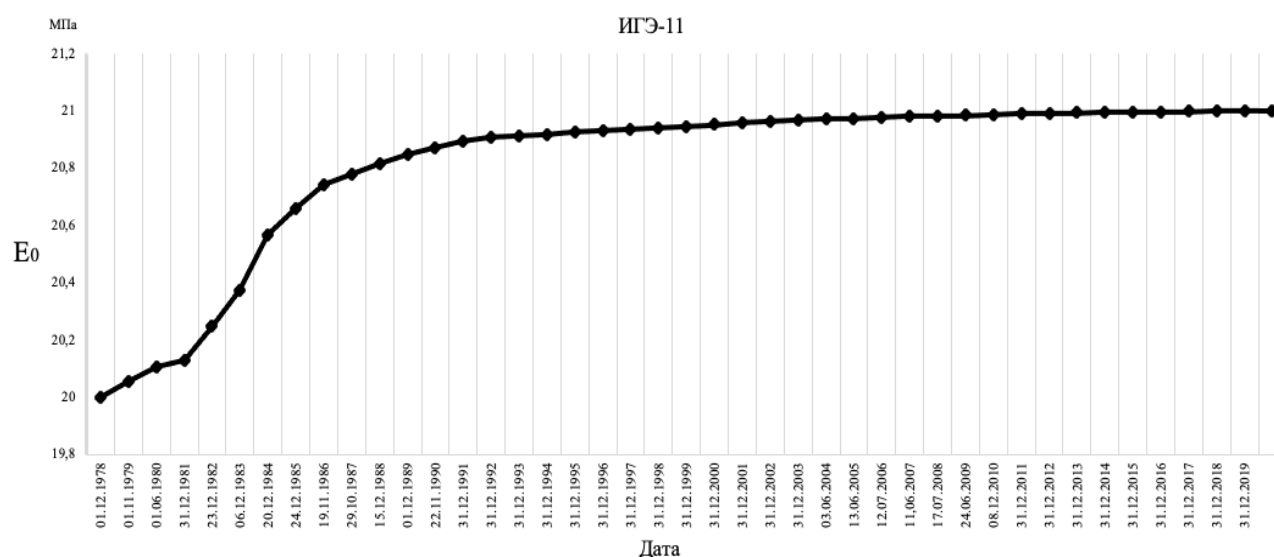


Рисунок 4. Характер и динамика изменения модуля общей деформации глины валдайского оледенения за период строительства и эксплуатации АЭС (разработано авторами)

Отсутствие изменения значений модуля деформации за период наблюдений связано очевидно с тем, что значение модуля деформации этих грунтов было принято проектировщиками по результатам одного штампового испытания (площадь штампа 10 000 см²) и составило 36 МПа.

Полученные нами значения модулей общей деформации натурными испытаниями грунтов методом статических нагрузок на винтовой штамп вблизи фундаментной плиты и лабораторными трехосными испытаниями практически не отличаются и варьируются в диапазоне 19–23 МПа.

Здесь следует иметь в виду, что последние изыскания предусматривали наклонное бурение скважин и отбор монолитов осуществлялся непосредственно из-под фундаментной плиты. Проведение статического зондирования и штамповых испытаний грунтов в пределах фундаментной плиты работающих реакторных отделений невозможно.

Алгоритм расчета изменения параметра определяемого свойства грунта по годам, основанный на системном анализе материалов инженерно-геологических изысканий разных лет приведен в таблице 1. Следуя законам формальной логики, можно утверждать, что количественные изменения основных параметров физических (плотности, коэффициента пористости и др.) и отдельных, в основном функционально зависящих от пористости, деформационных (модуля общей деформации) свойств грунта будет пропорционально величинам изменения наблюдаемой в процессе мониторинга за осадками фундаментной плиты. То есть, процент ежегодного изменения суммарной осадки грунтов основания толщи активной зоны основания, как единого инженерно-геологического элемента, должен в процентном отношении (по величине) соответствовать изменению (за довольно длительный срок ~1 год) физического или механического параметра свойств этого грунта.

Интерполируя характер изменения осадок грунтов основания (фундаментной плиты) на трансформацию интересующего исследователя свойства грунтов во времени, в нашем случае плотности грунта, можно получить величину изменения этого параметра в процентах или долях единицы от общей (суммарной) величины осадки грунтов основания. Получение ежегодного приращения осадки в процентах или долях единицы определяется частным от деления величины наблюдаемой осадки за год на величину осадки фундаментной плиты за весь период наблюдения, в нашем случае на 417,78 мм (см. таблицу 1, графу 4). Ежегодное приращение параметра исследуемого свойства грунта (графа 5 таблицы) определяется произведением величины суммарного приращения показателя параметра за весь срок наблюдения ($0,04 \text{ г/см}^3$) и величины ежегодного приращения осадки за год, выраженной в долях единицы или процентах. Расчетное значение параметра (графа 6 таблицы) определяется сложением значения приращения параметра к его значению в предыдущий год.

Таблица 1

**Алгоритм расчета физических параметров свойств грунтов основания
(на примере расчета плотности грунта) по результатам геодезического мониторинга**

Год	Наблюдаемая осадка за год, мм	Суммарная осадка по годам, мм	Ежегодное приращение осадки по отношению к конечной суммарной, в % / в д.е.	Ежегодное приращение плотности грунта, г/см^3	Расчет плотности грунта ρ , г/см^3
1	2	3	4	5	6
1977	0	0	0	0	2,040*
1978	23	23	5,505/0,055	0,002	2,042
1979	21	44	5,027/0,050	0,002	2,044
1980	9	53	2,154/0,022	0,001	2,045
1981	51,3	104,3	12,279/0,123	0,004	2,049
1982	51,3	155,6	12,279/0,123	0,005	2,054
1983	81,6	237,2	19,532/0,195	0,008	2,062
1984	38,4	275,6	9,192/0,092	0,004	2,066
1985	34,4	310	8,234/0,082	0,003	2,069
1986	15,7	325,7	3,758/0,038	0,002	2,071
1987	14,1	339,8	3,375/0,034	0,001	2,072
1988	14,56	354,36	3,485/0,035	0,001	2,073
1989	8,5	362,86	2,034/0,020	0,001	2,074
1990	9,82	372,68	2,351/0,024	0,001	2,075
1991	6,4	379,08	1,532/0,015	0,001	2,076
1992	2,12	381,2	0,507/0,005	0,000	2,076
1993	2,3	383,5	0,551/0,006	0,000	2,076
1994	2,3	385,8	0,550/0,006	0,000	2,076
1995	2,3	388,1	0,551/0,006	0,001	2,077
1996	2,3	390,4	0,550/0,006	0,000	2,077
1997	2,3	392,7	0,551/0,006	0,000	2,077

Год	Наблюдаемая осадка за год, мм	Суммарная осадка по годам, мм	Ежегодное приращение осадки по отношению к конечной суммарной, в % / в д.е.	Ежегодное приращение плотности грунта, г/см ³	Расчет плотности грунта ρ , г/см ³
1998	2,3	395	0,550/0,006	0,000	2,077
1999	2,3	397,3	0,551/0,006	0,001	2,078
2000	2,3	399,6	0,550/0,006	0,000	2,078
2001	2,3	401,9	0,551/0,006	0,000	2,078
2002	2,3	404,2	0,550/0,006	0,000	2,078
2003	2,3	406,5	0,551/0,006	0,000	2,078
2004	0,08	406,58	0,019/0,0002	0,000	2,078
2005	1,3	407,88	0,311/0,003	0,001	2,079
2006	1,5	409,38	0,359/0,004	0,000	2,079
2007	0,3	409,68	0,072/0,001	0,000	2,079
2008	0,9	410,58	0,216/0,002	0,000	2,079
2009	1,7	412,28	0,407/0,004	0,000	2,079
2010	1,4	413,68	0,335/0,003	0,000	2,079
2011	0,45	414,13	0,107/0,001	0,000	2,079
2012	0,45	414,58	0,108/0,001	0,000	2,079
2013	0,45	415,03	0,108/0,001	0,000	2,079
2014	0,45	415,48	0,107/0,001	0,000	2,079
2015	0,45	415,93	0,108/0,001	0,000	2,079
2016	0,45	416,38	0,108/0,001	0,000	2,079
2017	0,45	416,83	0,108/0,001	0,000	2,079
2018	0,45	417,28	0,107/0,001	0,000	2,079
2019	0,5	417,78	0,120/0,001	0,001	2,080

* В таблице значения плотности грунта приведены до третьего знака для большей наглядности изменения их значения во времени (по годам). Разработано авторами

Заключение

Наличие обширного архивного материала по инженерно-геологическим изысканиям на стадиях проектирования, строительства и многолетней эксплуатации наиболее ответственных зданий и сооружений большинства действующих АЭС, а также результатов многолетнего систематического мониторинга за кренами зданий и осадками их фундаментов является редким в строительной практике обстоятельством, позволяющим изучить трансформацию основных физико-механических свойств грунтов основания практически за весь жизненный цикл сооружения.

Важным условием оценки изменения свойств грунтов основания во времени являются результаты последних инженерно-геологических изысканий, выполняемых для обоснования дальнейшей сверхнормативной эксплуатации зданий и сооружений. Такие инженерно-геологические изыскания должны выполняться по специально разработанной (прошедшей все ведомственные согласования) программе и специально разработанной методике инженерно-геологических изысканий в крайне стесненных условиях работающей АЭС.

Предлагаемая методика исследования и прогнозирования изменений свойств грунтов основания наиболее ответственных сооружений АЭС на весь период жизненного цикла сооружений необходима для анализа изменения основных физико-механических свойств грунтов основания, для прогнозирования и обоснования возможности дальнейшей сверхнормативной, надежной и безопасной их эксплуатации на ближайшие 10–30 лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии: Недра, 1981. — 256 с.
2. Основы концепции геодинамической безопасности экологически опасных инженерных объектов / В.М. Макеев, Н.В. Макарова, В.Н. Леденев [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2015. — № 2. — С. 99–110. — EDN TSAVWT. (дата обращения: 15.01.2025).
3. Федунец Н.И. Проблема устойчивости зданий и сооружений при обеспечении безопасности атомных электростанций / Н.И. Федунец, Е.А. Гурьева // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — Отдельный выпуск № 11. — С. 9–20. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-ustoychivosti-zdaniy-i-sooruzheniy-pri-obespechenii-bezopasnosti-atomnyh-elektrostantsiy> (дата обращения: 15.01.2025).
4. Кашперюк, П.И. Влияние режима эксплуатации объектов АЭС на формирование свойств грунтов основания / П.И. Кашперюк // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2020. — № 1. — С. 64–66. — DOI 10.31857/S0869780920010068. — EDN RGPKAB. (дата обращения: 15.01.2025).
5. Соколов Н.С. Длительные исследования процессов деформирования оснований фундаментов при повышенных нагрузках / Н.С. Соколов // Жилищное строительство. — 2018. — № 5. — С. 3–8. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dlitelnye-issledovaniya-protsessov-deformirovaniya-osnovaniy-fundamentov-pri-povyshennyh-nagruzkah> (дата обращения: 15.01.2025).
6. Трофимов В.Т., Теоретические основы региональной инженерной геологии / В.Т. Трофимов, Т.И. Аверина: ГЕОС, 2007. — 464 с.
7. Manopov H.V., 2021. Measurement Of Sediments Of Industrial And Civil Buildings And Structures By High-Precision And Accurate Levelling Of Short Rays. The American Journal of Engineering and Technology, 3(05), 65–71, DOI: <https://doi.org/10.37547/tajet/Volume03Issue05-09> (дата обращения: 15.11.2024).
8. Игнатов В.И. Дискуссионные вопросы мониторинга оснований реакторных отделений АЭС с ВВЭР-1000 / В.И. Игнатов, В.Ф. Кольжанов, А.Г. Зализский // Труды Международной конференции ГЕОТЕХНИКА. Оценка состояния оснований и сооружений. — Санкт-Петербург, 2001. — Т. 2. — С. 60–67.
9. Кашперюк П.И. Методика исследований трансформации свойств грунтов основания на период геодезического мониторинга за осадками здания / П.И. Кашперюк, Д.А. Субботин // ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Сборник материалов IX ежегодной Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Александра Дмитриевича Потапова — Москва, — 2024. — С. 76–81. — URL: https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2024/Sbornik_Potapovskie-cheniya_2024.pdf (дата обращения: 15.01.2025).
10. Соколов Н.С. Прогноз осадок большегабаритных фундаментов при повышенном давлении на основания / Н.С. Соколов // Жилищное строительство. — 2018. — № 4. — С. 3–8. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognoz-osadok-bolshegarazmnyh-fundamentov-pri-povyshennom-davlenii-na-osnovaniya> (дата обращения: 15.01.2025).

Subbotin Dmitry Aleksandrovich

Mosinzhproekt, Moscow, Russia
MIP-Stroy No. 1
E-mail: Subbotin.DA@mosinzhproekt.ru

Kashperyuk Pavel Ivanovich

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: npf-sivs@yandex.ru

Kurochkina Valentina Alexandrovna

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
E-mail: Kurochkina@mgsu.ru

Methodology for studying the transformation of the properties of the soils of the foundations during the construction and operation of critical NPP facilities

Abstract. The article discusses the current problems of engineering, geological, geoecological and geotechnical studies of the foundations of the most critical structures of nuclear power plants to develop a justification for the possibility of their operation for a further excess period in modern, actually formed, geoecological conditions. The necessity of developing special methods for analyzing and processing information obtained at the initial (design) and final (operational) stages of the life cycle of such structures is substantiated, allowing, based on a retrospective analysis and identification of the dynamics of changes in the properties of the soils of the base of responsible structures, to solve predictive tasks for the possible safe operation of such large industrial facilities for a further excess period. An original methodology is proposed for the analysis and interpretation of materials from engineering and geological surveys, divided by time periods over several decades, to study the transformation of the basic physical and mechanical properties of soils over almost the entire life cycle of a structure and to establish their directional, irreversible and regular development under conditions of intense anthropogenic impact in the territories of modern nuclear power plants. The results of the analysis of the transformation of individual properties of the soils of the base of reactor facilities are presented, characterizing the changes in the parameters of these properties in space and time. The application of the developed research methodology makes it possible to predict the dynamics and magnitude of changes in the basic physical properties of the clay soils of the base and their further compressibility for the next 5, 10 and 30 years of operation of the nuclear power plant.

Keywords: foundation soils; transformation of soil properties; research methodology; analysis and processing of survey materials; forecast; retrospective constructions; engineering and geological conditions; geoecological conditions