



# СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

УДК 550.348.436+550.34

## АВТОР

**АРОНОВ А.Г.**, доктор физ.-мат. наук, директор Центра геофизического мониторинга НАН Беларуси

## АННОТАЦИЯ

*В работе приводятся результаты комплекса сейсмологических исследований в составе инженерных изысканий на различных этапах строительства Белорусской АЭС, в том числе по изучению региональной и местной сейсмичности и сейсмотектонических условий, проведению сейсмологического мониторинга, оценке сейсмической опасности и определению проектных уровней сейсмических воздействий.*

*The paper presents the results of a complex of seismological investigations carried out as a part of the engineering surveying works at different stages of the construction of the Belarusian NPP. The seismological investigations involved the studies of the regional and local seismicity and seismotectonic conditions, the seismological monitoring, the seismic hazard assessment, the determination of the design level of seismic effects.*

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

АЭС, строительство, сейсмичность, наблюдения, интенсивность

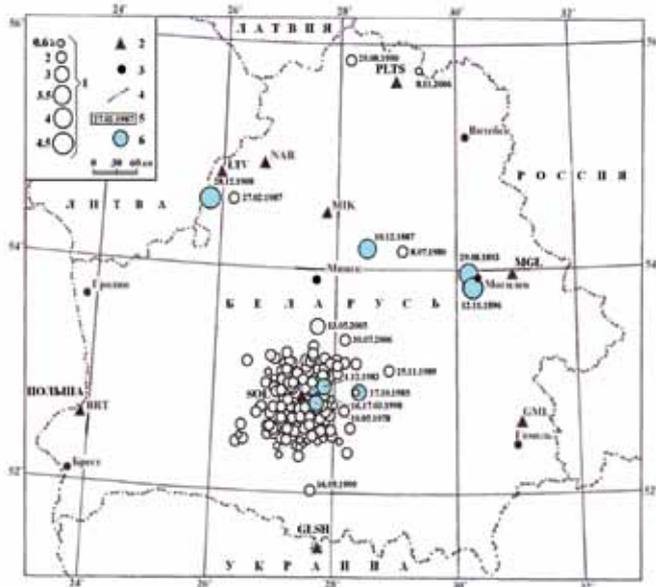
## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время накоплен большой международный опыт, который позволил выработать основные базовые принципы и критерии обеспечения сейсмической безопасности для размещения АЭС, регламентируемые требованиями и рекомендациями международных и национальных нормативных документов [1–4]. Вместе с тем практика показывает, что сейсмотектонические условия и геодинамические факторы для различных районов существенно различаются и обусловлены спецификой их геологического развития. Это в свою очередь требует проведения большого комплекса сейсмологических исследований на различных этапах строительства АЭС.

Территории Беларуси, стран Балтии, западных регионов России и платформенная часть территории Украины составляют единый сейсмотектонический регион, расположенный на западе Восточно-Европейской платформы (ВЕП), имеющий сходное геологическое развитие и общие современные геодинамические условия. Регион характеризуется относительно невысокой сейсмической активностью, однако и в его пределах выявлены очаги сейсмических событий с магнитудой  $M \leq 5,5$  [5]. Проявления сейсмичности в регионе связаны с существованием ряда крупных сейсмогенерирующих тектонических структур.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЙСМИЧНОСТИ БЕЛОРУСИ

Изучение сейсмичности Беларуси базировалось на информации, собранной из разных литературных и архивных источников и результатов непрерывных инструментальных наблюдений. В результате был составлен каталог землетрясений территории Беларуси с 1887 года по настоящее время. В



**Рис.1.** Карта эпицентров сейсмических событий территории Беларуси за период 1887–2014 годы. 1 – магнитуда землетрясений; 2 – сейсмические станции; 3 – города; 4 – государственная граница; 5 – дата землетрясений; 6 – ощутимые землетрясения.

каталог вошло более 1300 сейсмических событий с  $M \leq 4,5$ , в том числе и четыре сильных исторических землетрясения 1887, 1893, 1896, 1908 годов. Каталог землетрясений Беларуси положен в основу карты эпицентров сейсмических событий территории Беларуси (рис. 1).

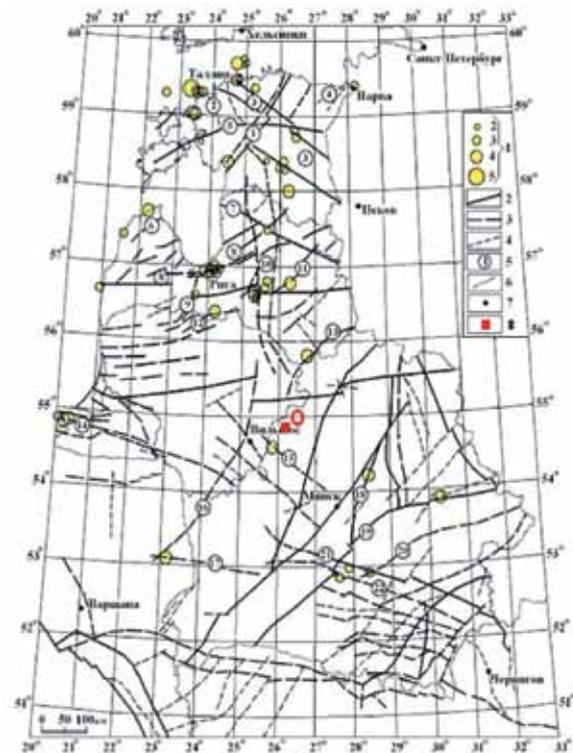
Концентрация эпицентров землетрясений невысокого энергетического уровня наблюдается в южной части территории Беларуси. Приурочена она к зоне сочленения северо-западной части Припятского прогиба и Белорусской антеклизы. Эта зона характеризуется проявлением индуцированной сейсмичности, связанной с масштабными горнопромышленными работами на Старобинском месторождении калийных солей (Солигорский горнопромышленный район). Участки повышенного уровня слабой сейсмичности распространяются и к северу от этой зоны.

Площадка Белорусской АЭС испытывает сейсмические воздействия, как от удаленных, так и от близких землетрясений.

На севере это очаги землетрясений Фенноскандии и Арктики, на востоке и юго-востоке - Сибири и Средней Азии, на юге – землетрясения Кавказа и Крыма, на юго-западе и западе сейсмические очаги Европы. Амплитуды смещений почвы на территории Беларуси, вызываемые сейсмическими волнами от удаленных землетрясений в основном незначительны. Исключение составляют землетрясения из сейсмогенной зоны Вранча, расположенной на крутом изгибе горной дуги в месте сочленения Восточных и Южных Карпат (восточная часть Румынии). Очаги этих землетрясений имеют глубину до 200 км, а ощутимый эффект сейсмических волн от землетрясений с магнитудой 7,0–7,6 наблюдается на большей территории Восточной Европы. Землетрясения очаговой зоны Вранча занимают незначительную часть литосферы, пример-

но 100x100x200км, в которой выделяется аномально большое количество энергии, сравнимое по величине с наиболее сейсмически активными участками земной коры. Согласно расчетам, в районе Вранча возможны землетрясения с магнитудой  $M=8,0$ . Магнитуда  $M=7,5 \pm 0,5$  землетрясения 10 октября 1446 г. подтверждает этот вывод. Сильные землетрясения в районе Вранча возникают сравнительно часто. За второе тысячелетие здесь произошло 35 разрушительных землетрясений с  $M \geq 7,0$  и интенсивностью в эпицентре  $I_0 \geq 8$  баллов по шкале MSK-64. Только за последние 60 лет четыре из них – в 1940, 1977, 1986, 1990 гг. – ощущались на территории Беларуси с интенсивностью 3–5 баллов.

В результате изучения литературных и архивных источников, баз данных международных и национальных сейсмологических центров были собраны материалы об исторических и современных инструментально зарегистрированных ощутимых землетрясениях западной части ВЕП за период с 1602 по 2014 год. На основе каталога и геолого-геофизических данных составлена карта эпицентров ощутимых землетрясений и основных разрывных нарушений западной части ВЕП (рис. 2).



**Рис.2.** Карта эпицентров ощутимых землетрясений и основных разрывных нарушений западной части ВЕП: 1 – магнитуда землетрясений; 2–4 разломы и зоны разломов: 2 – суперрегиональные, ограничивающие крупнейшие надпорядковые структуры; 3 – региональные; 4 – субрегиональные; 5 – наименования разломов (цифры в кружках): 1 – Пярну-Тапаская зона, 2 – Вихтерпалуский, 3 – Палдийско-Псковская зона, 4 – Ахтмеский, 5 – Тартуский, 6 – Курземско-Пярнская зона, 7 – Северо-Латвийский, 8 – Лиепайско-Рижская зона, 9 – Таурагско-Огрский, 10 – Восточно-Латвийская зона, 11 – Гулбекский, 12 – Тяльшяйско-Эрглинская зона, 13 – Восточно-Литовский, 14 – Прегольская зона, 15 – Ошмянский, 16 – Верхненеманский, 17 – Свислочский, 18 – Борисовский, 19 – Стоходско-Могилевский, 20 – Кричевский, 21 – Северо-Припятский, 22 – Речицкий); 6 – государственная граница; 7 – город; 8 – площадка АЭС.



Распределение эпицентров показывает, что высокая концентрация эпицентров наблюдается в северной части региона и его береговой линии. Здесь наиболее характерными являются местные тектонические землетрясения, причиной возникновения которых были сейсмогенные зоны, приуроченные к доплатформенным и платформенным тектоническим разломам. Максимальная интенсивность землетрясений связана с восточной частью Литвы и Латвии, а также северо-западной частью Латвии и значительной частью западной Эстонии, включая ее прибрежные острова, Калининградской областью России. С тектонической позиции эти районы Прибалтики относятся к прибортовой зоне Балтийской синеклизы.

Сопоставление распределения эпицентров землетрясений с разломной тектоникой региона показывает, что очаги землетрясений, в основном, расположены в зонах разломов. На карте (рис. 2) разломы и разломные зоны, в которых проявилась сейсмическая активность в разное историческое время, обозначены кружком и пронумерованы. Крупные субширотные и субмеридианальные разломы создают сложную блоковую структуру региона. Некоторые разломы или их звенья не проявили пока сейсмической активности, однако, это не свидетельствует о том, что они не являются сейсмогенными.

На основе комплексного анализа геологических, геофизических и сейсмологических данных выделены зоны возможного возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) Белорусско-Прибалтийского региона и определены их параметры [6, 7]. При проведении анализа были рассмотрены все потенциальные сеймотектонические активные структуры. При этом сначала проводилась оценка общего уровня тектонической активности отдельных участков структур, а затем – геолого-геофизическая оценка мест расположения известных очагов землетрясений. Основным критерием отнесения изучаемых структур к сейсмогенерирующим, которые можно отождествлять с зонами ВОЗ, было установление в их пределах эпицентров землетрясений. Таким образом выделение зон ВОЗ проводилось на основе сейсмогеологических данных с одной стороны и с прогнозной оценкой их сеймотектонического потенциала  $M_{max}$  – с другой. В результате была сделана окончательная оценка  $M_{max}$  для каждой сейсмогенной зоны и уточнены границы зон ВОЗ.

При уточнении геолого-геофизических и сейсмологических условий были составлены сеймотектонические карты районов расположения конкурентных пунктов возможного размещения АЭС с выделенными зонами ВОЗ и параметрами этих зон, рассчитаны сейсмические воздействия как от ближайших зон ВОЗ, так и от сильных землетрясений из зоны Вранча.

Ближайшими к выбранной по результатам изысканий Островецкой площадке размещения АЭС являются зоны ВОЗ: Ошмянская и Даугавпилсская (рис. 3).



Рис.3. Схема расположения ближайших зон ВОЗ: 1– зона возникновения очагов землетрясений; 2 – Островецкая площадка размещения АЭС; 3 – Ошмянская сейсмогенная зона ( $M_{max}=4,5$ ;  $D = 19$  км;  $H=5$  км); 4 – Даугавпилсская сейсмогенная зона ( $M_{max}=4,5$ ;  $D = 67,5$  км;  $H=8$  км).

## СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

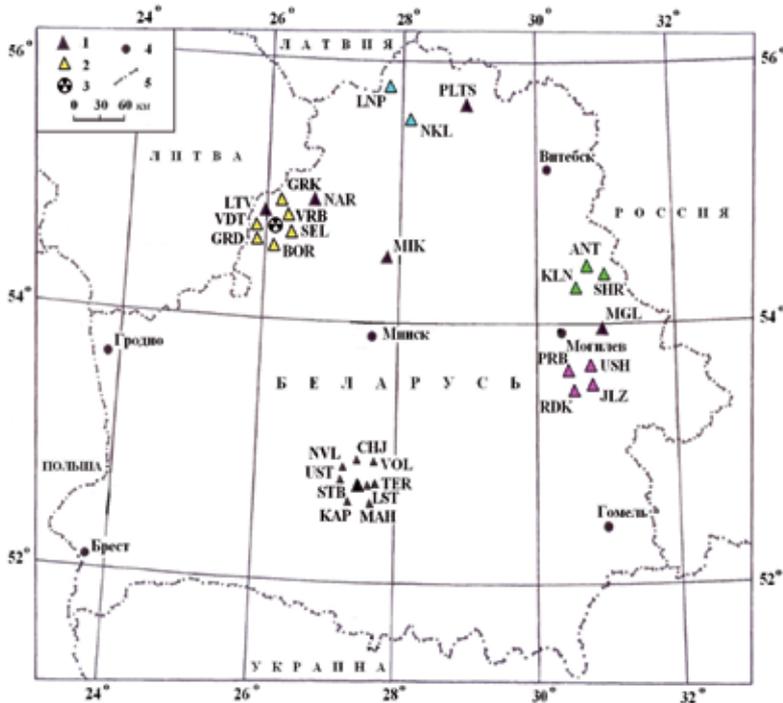
Сейсмологический мониторинг при проведении исследований по выбору перспективных пунктов и площадки для размещения АЭС осуществлялся системой непрерывных круглосуточных наблюдений за происходящими сейсмическими событиями естественного и искусственного происхождения в широком диапазоне энергий и расстояний [8].

Для проведения сейсмических наблюдений в пределах перспективных пунктов размещения АЭС были организованы локальные временные сети сейсмических станций (рис. 4).

За период наблюдений проведена детальная обработка и анализ зарегистрированной информации, составлены бюллетени и каталоги сейсмических событий.

Нормативные документы, регламентирующие все аспекты жизнедеятельности АЭС, начиная с этапа предпроектных изысканий и заканчивая этапом ее ликвидации, предусматривают проведение мониторинга природной среды, включая сейсмологический мониторинг [1–3].

Основная цель системы сейсмологического мониторинга в районе расположения площадки Белорусской АЭС заключается в следующем:



**Рис.4.** Сеть сейсмических станций, расположенных на территории Беларуси: 1 – сейсмические станции стационарные: ММК – Минск, NAR – Нарочь, PLTS – Полоцк, MGL – Могилев, STB – Старобин и локальная сеть (VOL – Волаты, TER – Терушки, UST – Устронь, CHJ – Чижовка, KAP – Капацевичи, NVL – Новый луг, MAH – Махановичи, LST – Листопадовичи; 2 – сейсмические станции временные: Островецкая площадка: Вадатишки – VDT, Градовщица – GRD, Бояры – BOR, Селище – SEL, Воробы – VRB, Горная Каймина – GRK, Ливтяны – LTV; Кранопольная площадка: PRB – Прибережье, USH – Усушек, JLZ (GLZ) – Железинка, RDK (RAD) – Радьков; Кукшинская площадка: SHR – Широкие, ANT – Антипенки, KLN – Клин, PLN (MGL) – Пилещено (Могилев); 3 – площадка строительства Белорусской АЭС; 4 – город; 5 – государственная граница.

- уточнение влияния удаленных землетрясений на сейсмичность площадки АЭС;
- определение наличия (или отсутствия) современной местной сейсмичности и ее параметров;
- уточнение параметров сейсмической активности геоструктур;
- уточнение оценок сейсмичности площадки АЭС для уровней ПЗ и МРЗ.

Локальная сейсмическая сеть, развернутая в районе Островецкой площадки АЭС в 2008 году, в настоящее время состоит из 7 пунктов наблюдений, оборудованных короткопериодными сейсмометрами Le 3DLite, что дает возможность обеспечить надежную регистрацию сейсмических событий. Ошибка в локализации возможных сейсмических событий от ближайшей к площадке Ошмянской зоны ВОЗ не более  $\pm 1$  км, а значение минимальной магнитуды сейсмического события, которую способна уверенно зарегистрировать сеть в этой зоне,  $M \geq -0,3$ .

## ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

Значения сейсмических воздействий, характеризующих степень сейсмической опасности и

применяемых в нормативных документах, определяются в терминах максимального расчетного землетрясения (МРЗ) и проектного землетрясения (ПЗ). При этом под ПЗ понимается землетрясение с максимальными сейсмическими воздействиями повторяемостью один раз в 100 лет. Величина ПЗ принимается ниже значения МРЗ на один балл. В соответствии с требованиями общих положений обеспечения безопасности атомная электростанция должна быть безопасной при сейсмических воздействиях до МРЗ включительно, а выработку электрической и тепловой энергии обеспечивать вплоть до уровня ПЗ включительно.

В качестве нормативной основы для оценки степени сейсмической опасности площадки размещения Белорусской АЭС, которая по результатам комплексных изыскательских работ была выбрана в Островецком районе Гродненской области, принята карта общего сейсмического районирования Северной Евразии ОСР-97-D масштаба 1:10000000, где представлена и территория Беларуси [9]. Карта соответствует повторяемости сейсмического эффекта в среднем один раз в 10000 лет (среднегодовой риск – 10–4) и вероятности  $P=0,5\%$  возникновения и возможного превышения в течение 50 лет сейсмического эффекта, указанного на ней в баллах шкалы MSK-64, и предназначена для оценки сейсмической опасности районов расположения атомных станций, радиоактивных захоронений и других чрезвычайно ответственных сооружений. Эта карта разработана в ОИФЗ РАН (1991–1997 годы) с участием белорусских специалистов и в 2001 году принята в качестве нормативной. В Республике Беларусь фрагмент этой карты, включающей территорию Беларуси и прилегающих районов, был принят в качестве временной нормативной основы в 2008 году [4]. Уровень вероятности данной карты соответствует уровню максимального расчетного землетрясения. Детализация исследований основана на карте сеймотектонического районирования западной части Восточно-Европейской платформы с выделенными зонами ВОЗ масштаба 1:1500000 [6,7].

Согласно Карте ОСР-97-D (рис. 5) площадка Белорусской АЭС расположена в 7 - балльной зоне (уровень МРЗ).

Величина проектного землетрясения ПЗ в соответствии с установившейся практикой оценивается ниже МРЗ на один балл, т.е. ПЗ – 6 баллов.

Выполненные исследования по уточнению геодинамических и сеймотектонических условий (уточнение исходной сейсмичности) для района радиусом 300 км от площадки (масштаб 1:500 000) и ближнего района радиусом 30 км (масштаб 1:50

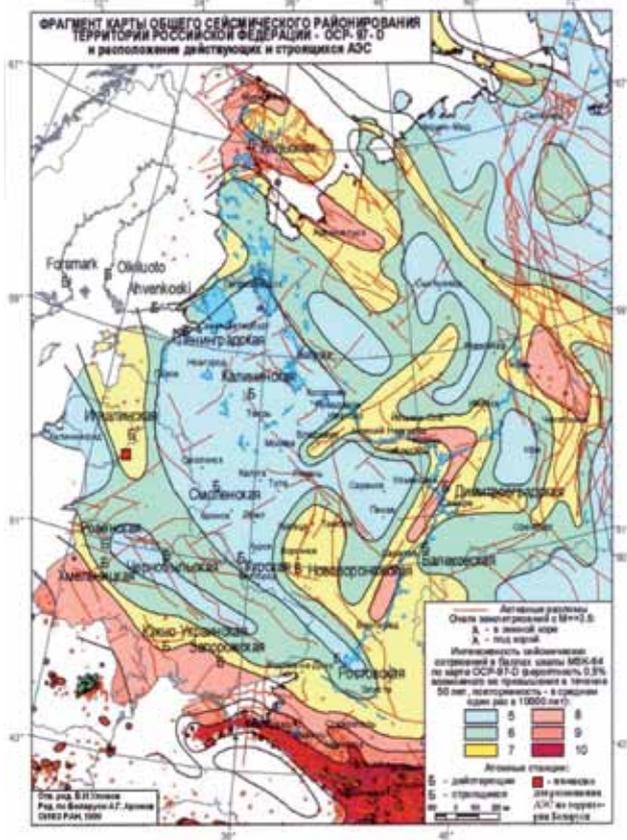


Рис.5. Фрагмент карты ОСР-97-D Северной Евразии.

000) подтвердили представительность расчетных сейсмических воздействий по ОСР [10].

Для уточнения оценки сейсмической опасности Островецкой площадки с учетом реальных грунтовых условий в 2009–2012 гг. выполнялись работы по сейсмическому микрорайонированию (СМР) инструментальными (регистрация взрывов и микросейсм) и расчетным (сейсмических жесткостей) методами.

По результатам СМР значение приращения интенсивности сейсмических воздействий за счет грунтовых условий не превысило +0,5 балла.

Таким образом, для Островецкой площадки строительства Белорусской АЭС окончательно приняты следующие значения: для уровня ПЗ – 6 - баллов; для уровня МРЗ – 7 - баллов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководства по безопасности. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных. (РБ-019-01). Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности (Госатомнадзор России). – М., 2001. – 29 с.
2. Технический кодекс установившейся практики. Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. (ТКП 097-2007 (02300)).

3. Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – Минск, 2007. – 26 с.
4. Технический кодекс установившейся практики. Размещение атомных станций. Основные требования по составу и объему изысканий и исследований при выборе пункта и площадки АС. (ТКП 098-2007 (02250/02300)). Министерство архитектуры и строительства, Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. – Минск, 2007. – 75 с.
5. Технический кодекс установившейся практики. Высотные здания. Строительные нормы проектирования. (ТКП 45-3.02-108-2008 (02250)). Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2008. – 85 с.
6. Аронов А.Г. Сейсмичность территории Беларуси / Аронов А.Г., Сероглазов Р.Р., Аронова Т.И. // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы: в 2 кн. / кн. 1: Землетрясения; под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 357–364.
7. Сейсмогеодинамика Беларуси и Прибалтики / [Айзберг Р.Е., Аронов А.Г., Гарецкий Р.Г. и др.] // Литасфера. – Минск, 1997. – № 7. – С. 5–18.
8. Сейсмогеодинамическое районирование западной части Восточно-Европейской платформы: в 2 кн. / кн. 1: Землетрясения / [Айзберг Р.Е., Аронов А.Г., Гарецкий Р.Г. и др.]; ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 368–381.
9. Аронов А.Г. Сеть сейсмических станций Беларуси // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы: в 2 кн. / кн. 1: Землетрясения / Аронов А.Г., Сероглазов Р.Р., Аронова Т.И.; ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 350–353.
10. Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и вероятностное сейсмическое районирование Северной Евразии / Уломов В.И., Шумилина Л.С. // Геофизика на рубеже веков. – Избр. труды ученых ОИФЗ РАН. – 2000. – С. 216–252.
11. Нормы проектирования атомных станций: НП-031-01. – Госатомнадзор РФ. – Москва, 2001. – 26 с.