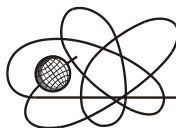




Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



ИБРАЭ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2001-14

Preprint IBRAE-2001-14

Н.И. Жилина, С.В. Казаков, В.П. Киселев, А.Л. Крылов

**Верификация и анализ практической применимости
моделей прогнозирования последствий радиационного
загрязнения водоемов**

Москва
2001

Moscow
2001

УДК 504.054

Н.И. Жилина, С.В. Казаков, В.П. Киселев, А.Л. Крылов. Верификация и анализ практической применимости моделей прогнозирования последствий радиационного загрязнения водоемов. Препринт № IBRAE-2001-14. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2001, 27 с. — Библиогр.: 9 назв.

Аннотация

В препринте описывается верификация моделей, включенных в геоинформационно-моделирующую систему «Кассандра», анализируется практическая применимость моделей и соответствие их (а также системы в целом) нормативным требованиям и рекомендациям. Также приводится тестовый расчет и анализ последствий гипотетической радиационной аварии на Калининской АЭС.

©ИБРАЭ РАН, 2001

Gilina N., Kazakov S., Kiselev V., Krylov A. Verification and analysis of practical applicability of the models of prognosis of radioactive contamination of water objects. Preprint № IBRAE-2001-14. Moscow: Nuclear Safety Institute RAS, 2001, 27 p. — Refs.: 9 items.

Abstract

In the work the verification, analysis of practical applicability and conformity to the normative documents of the models included in the GIS-based informational modeling system «Kassandra» are discussed. The test calculation and analysis of consequences of speculative nuclear accident at the Kalinin Nuclear Power Plant are presented also.

©Nuclear Safety Institute, 2001

Верификация и анализ практической применимости моделей прогнозирования последствий радиационного загрязнения водоемов

Н.И. Жилина, С.В. Казаков, В.П. Киселев, А.Л. Крылов

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52

тел.: (095) 955-22-96, эл. почта: kis@ibrae.ac.ru

1. Верификация моделей, включенных в компьютерную модель Basin

Верификация модели прогноза радиоактивного загрязнения воды и донных отложений слабопроточных водоемов при нарушении нормальной эксплуатации АЭС и ЯЭУ проводилась на данных радиационного мониторинга пяти водоемов: водоема-охладителя ЧАЭС, озер Браччиано (Bracciano), Святое озеро (Белоруссия), Эствейт и Виндермер (Esthwaite and Windermere). Загрязнение этих водоемов произошло в результате аварии на ЧАЭС.

Водоем охладитель Чернобыльской АЭС

Верификация модели на данных радиационного мониторинга водоема охладителя ЧАЭС проводилась на основе данных приведенных в [2].

Основываясь на приведенных в книге данных, были выбраны следующие параметры водоема охладителя: тип донных отложений – ил торфянистый, площадь зеркала 22.7 км^2 , средняя глубина 6.56 м, потери на фильтрацию $3.95 \text{ м}^3/\text{с}$, площадь водосбора водоема 16.87 км^2 .

В работе приводятся данные о первоначальном загрязнении воды водоема-охладителя за счет разового выпадения. Приводятся данные о процентном вкладе различных радионуклидов в суммарную активность воды сразу после аварии, а также осенью 1986 года. Приводятся данные о загрязнении донных отложений осенью 1986 года, а также о процентном вкладе каждого радионуклида в суммарную активность. Приводятся данные (для различных радионуклидов) о проценте радионуклидов находящихся в воде и в донных отложениях, об отношении концентрации в воде и в донных отложениях. Приводятся экспериментальные данные о периодах полувыведения радионуклидов из водоема охладителя.

Аналогичные значения были получены с использованием модели Basin. Результаты сравнения вычисленных моделью Basin и экспериментальных значений приводятся ниже.

Наблюдается сильное (на порядок) превышение абсолютных значений загрязнения воды и донных отложений водоема охладителя, полученных в результате радиационного мониторинга над результатами моделирования (Рис.1, Рис. 2). Это объясняется недостаточностью (для точного прогнозирования по модели) входных данных о загрязнении водоема охладителя. В работе [2] приведены данные о первоначальном выпадении радионуклидов на зеркало водоема охладителя. Эти данные и были использованы как исходные. Однако не вызывает никакого сомнения, что было значительное поступление радионуклидов в водоем охладитель и в дальнейшем. Это следует из того, что:

1. Сентябрьские экспериментальные данные о концентрации радионуклидов в воде превышают начальные (апрельские), рассчитанные исходя из мгновенного и равномерного распределения радионуклидов, выпавших аэрозольно, по всему объему водоема. Притом, что, очевидно, что при отсутствии поступления извне концентрации могут только уменьшаться со временем.
2. В работе [2] приводится оценочное значение суммарного загрязнения водоема охладителя (200000 кюри), что на порядок превышает суммарное первоначальное аэрозольное загрязнение.
3. Из физических соображений, очевидно, что загрязнению подвергся не только водоем охладитель, но и его водосбор. Поэтому дальнейшее загрязнение водоема происходило, в частности, за счет смыва радионуклидов с водосбора.

В то же время наблюдается очень хорошее соответствие между экспериментальными и рассчитанными по модели значениями периода полувыведения радионуклидов (Рис. 3). Это позволяет сделать вывод

о правильном описании моделью процессов перераспределения радионуклидов в водоеме и процессов выведения радионуклидов из водоема. А это в свою очередь позволяет сделать вывод о возможности применения модели при наличии полных данных о загрязнении водоема.

Также наблюдается очень хорошее соответствие между экспериментальными и рассчитанными по модели данными о долях радионуклидов содержащихся в воде и в донных отложениях (Рис. 4, Рис. 5). Это позволяет сделать вывод о правильном описании моделью процессов перераспределения радионуклидов между водой, донными отложениями водоема и взвесью, а также о применимости модели для оценки загрязнения донных отложений водоемов, а также вторичного загрязнения воды от донных отложений.

Наблюдается также неплохое соответствие экспериментальных данных и результатов прогнозирования по соотношениям концентраций различных радионуклидов в воде и в донных отложениях. Однако в случае отдельных радионуклидов наблюдаются значительные расхождения. Они объясняются тем, что доли поступления активности при первоначальном аэрозольном выпадении на зеркало водоема различны.

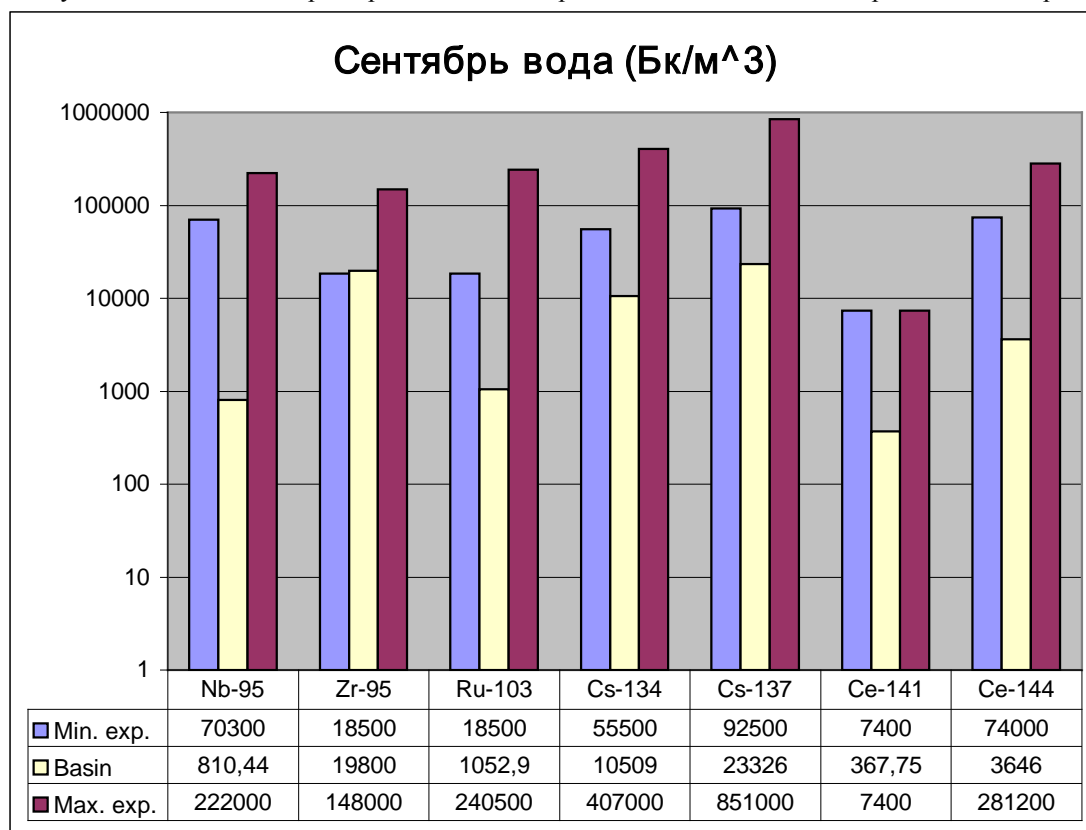


Рис.1. Загрязнение водоема-охладителя ЧАЭС в 1986 году

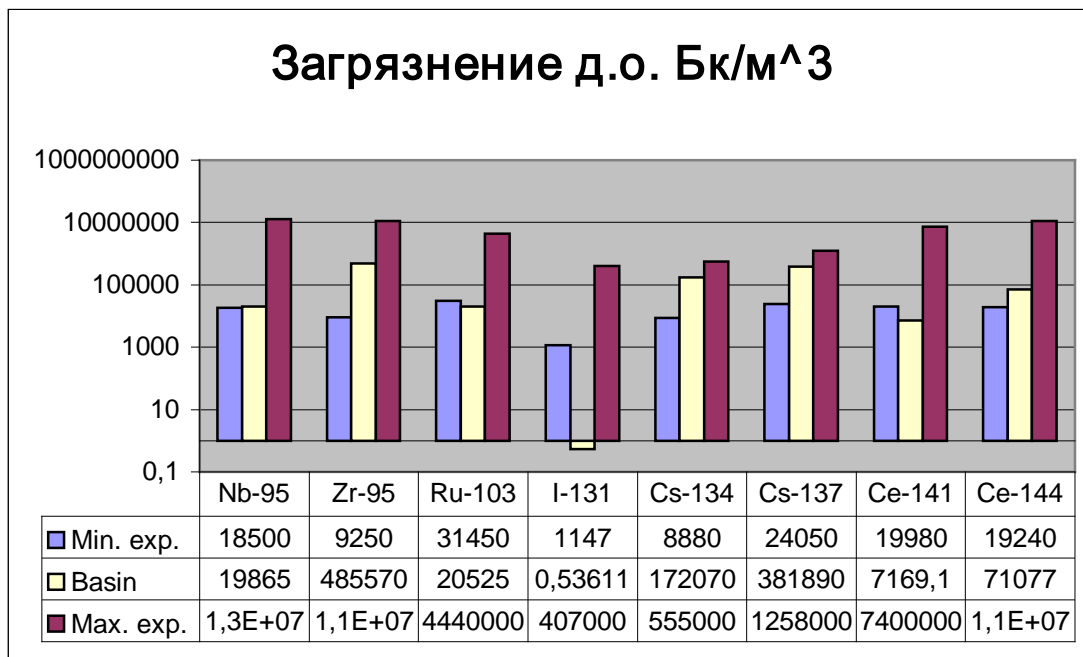


Рис. 2. Загрязнение водоема-охладителя ЧАЭС в 1986 году

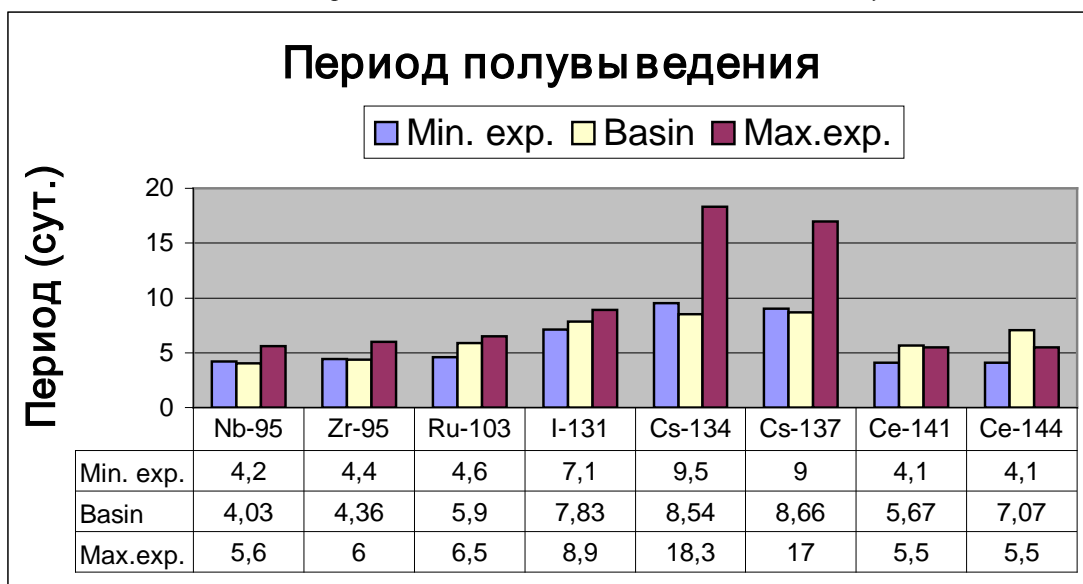


Рис. 3. Самоочищение водоема-охладителя ЧАЭС

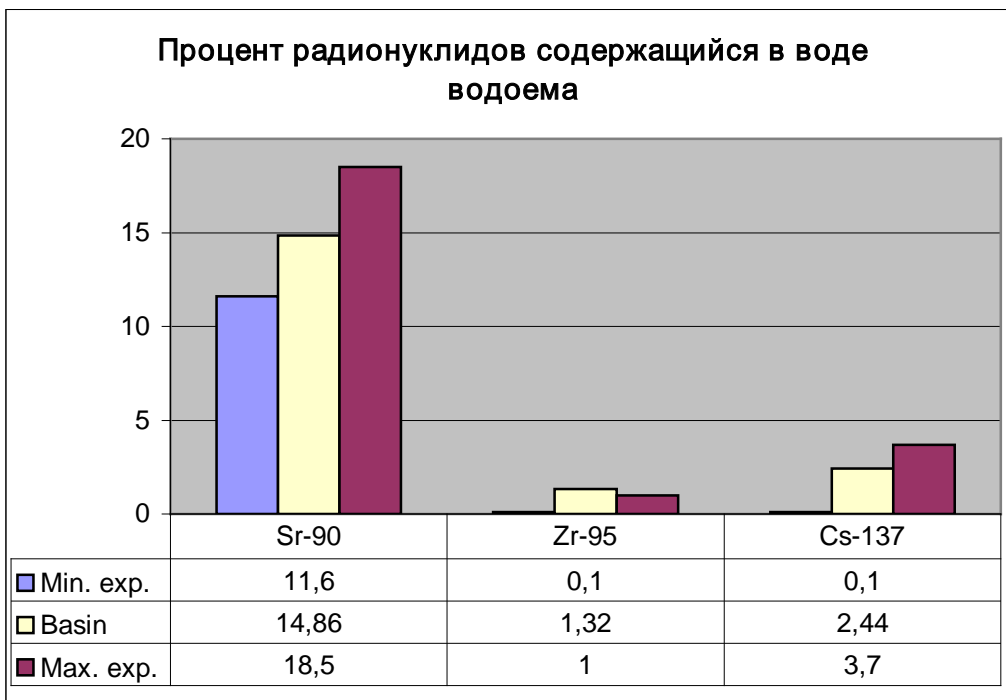


Рис. 4. Загрязнение водоема-охладителя ЧАЭС в 1986 году

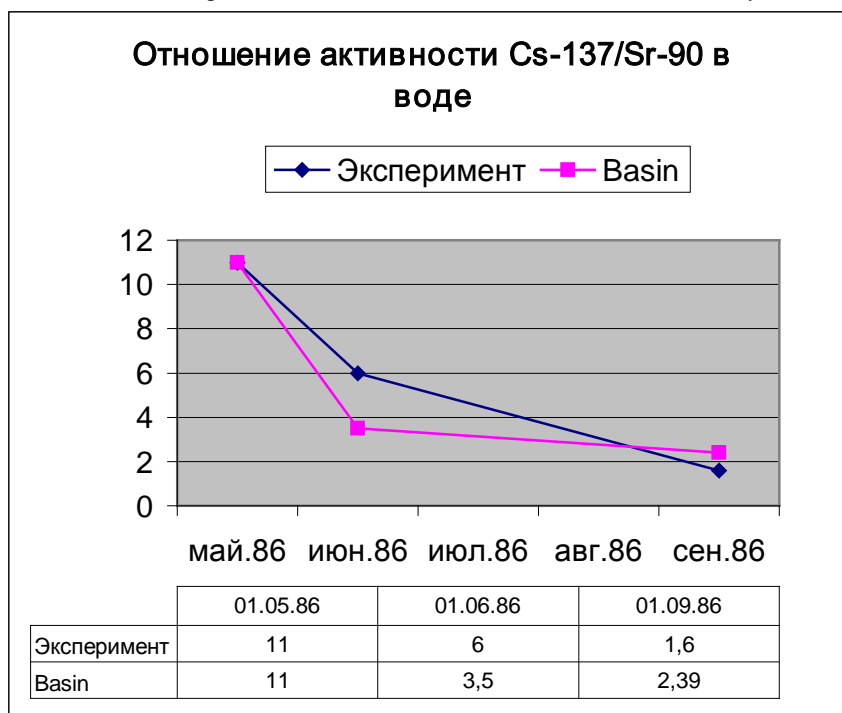


Рис. 5. Загрязнение водоема-охладителя ЧАЭС в 1986 году

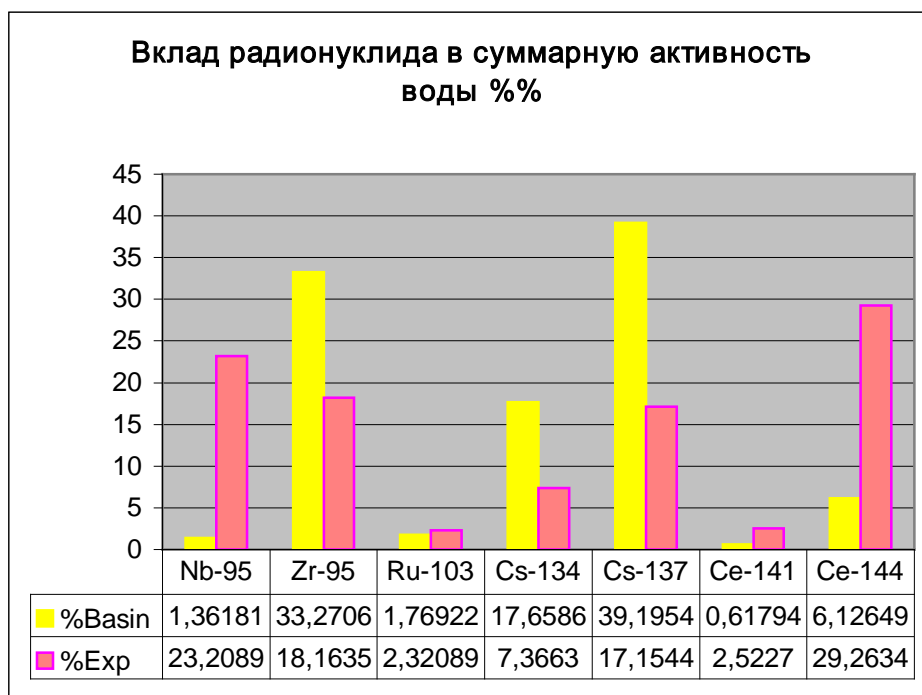


Рис. 6. Загрязнение водоема-охладителя ЧАЭС в 1986 году

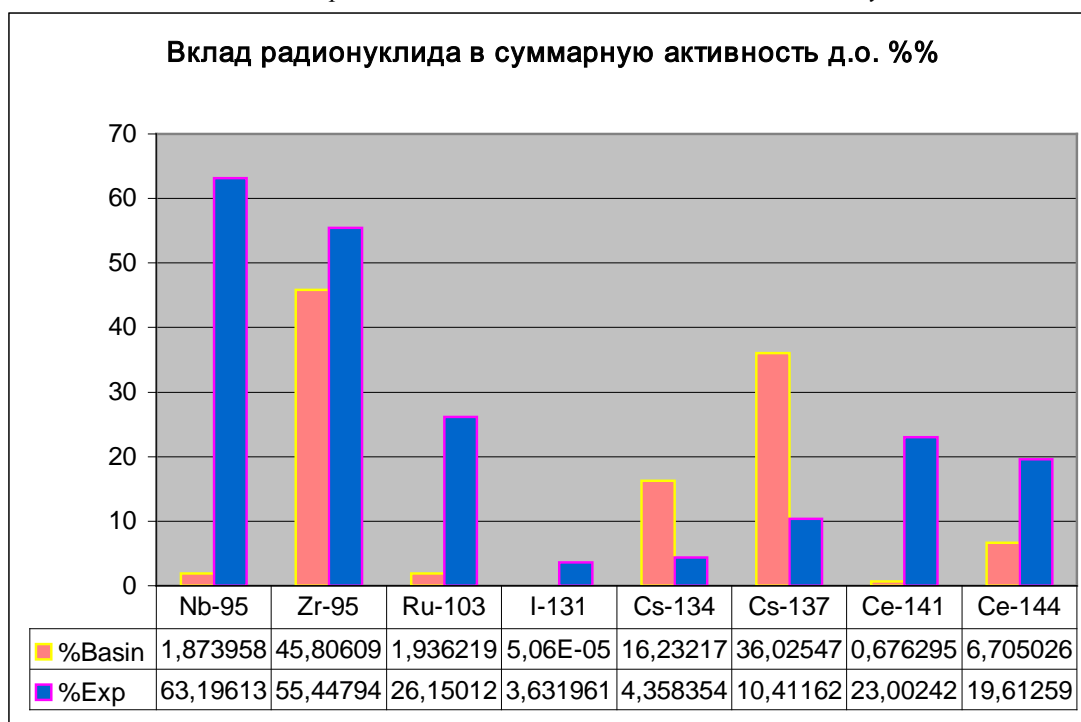


Рис. 7. Загрязнение водоема-охладителя ЧАЭС в 1986 году

Анализ данных о биоте водоема-охладителя ЧАЭС, приведенных в работе [2], также подтверждает правомерность использования положения, использованного при построении модели о пренебрежимости влияния биоты на поведение радионуклидов. Так согласно данным работы в биоте концентрируется около 1% радионуклидов. Радионуклиды, концентрированные в биоте играют важнейшую роль в процессах миграции радионуклидов по пищевым цепям, но их влияние на концентрацию воды и донных отложений незначительно. Разве что, присутствие биоты способствует перемешиванию и равномерному распределению загрязнения по водоему. А мгновенное равномерное распределение радионуклидов по всему объему водной массы является одним из основных положений при построении модели Basin.

Святое озеро

Сравнение результатов работы модели было проведено с результатами измерений концентрации радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и донных отложениях Святого озера, расположенного в Белоруссии, на границе с Брянской областью [3].

Морфометрические данные озера: площадь зеркала - 0,23 км², средняя глубина - 7 м, площадь водосбора - 3 км². Тип донных отложений - ил глинистый.

Плотность загрязнения - 1800 кБк/м² по ^{137}Cs в 1986 году после аварии на Чернобыльской АЭС. Отношение загрязнения $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs} = 0,01$.

Интегрированные результаты измерений и рассчитанных по модели сведены в следующие таблицы по ^{137}Cs и ^{90}Sr .

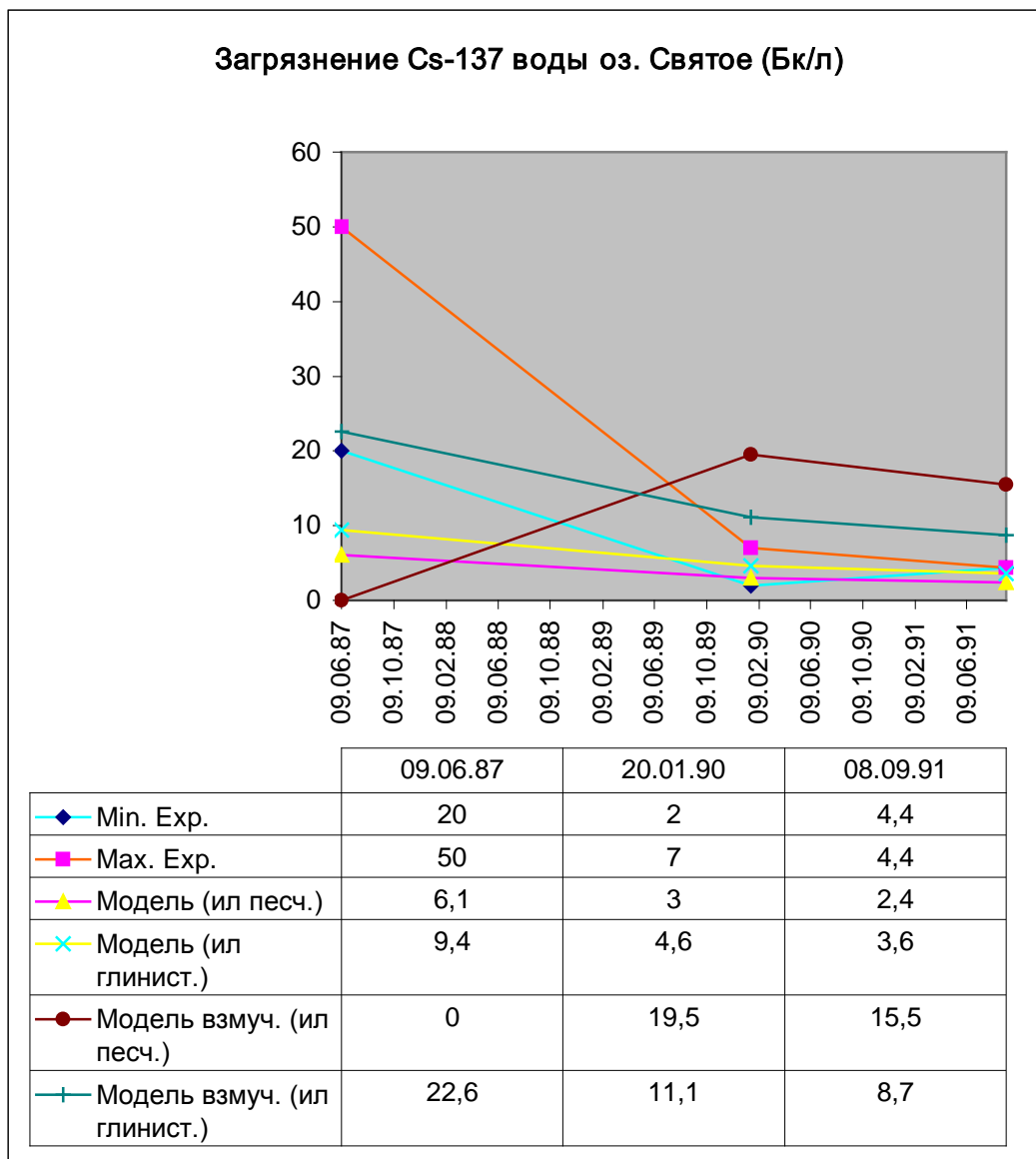
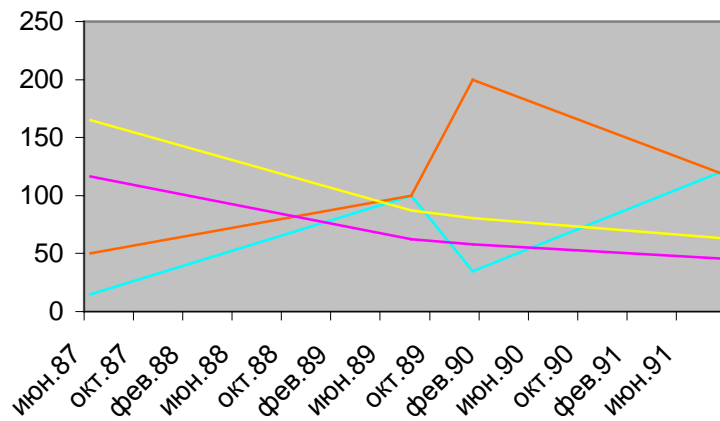


Рис. 8. Загрязнение ^{137}Cs воды оз. Святое (Бк/л)

Загрязнение Cs-137 д.о. оз. Святое (кБк/кг)



	09.06.87	18.08.89	20.01.90	08.09.91
Min. Exp.	15	100	35	120
Max. Exp.	50	100	200	120
Модель (ил песч.)	116,4	62,4	57,9	45,9
Модель (ил глинист.)	164,8	87,2	80,7	63,7

Рис. 9. Загрязнение ^{137}Cs д.о. оз. Святое (кБк/кг)

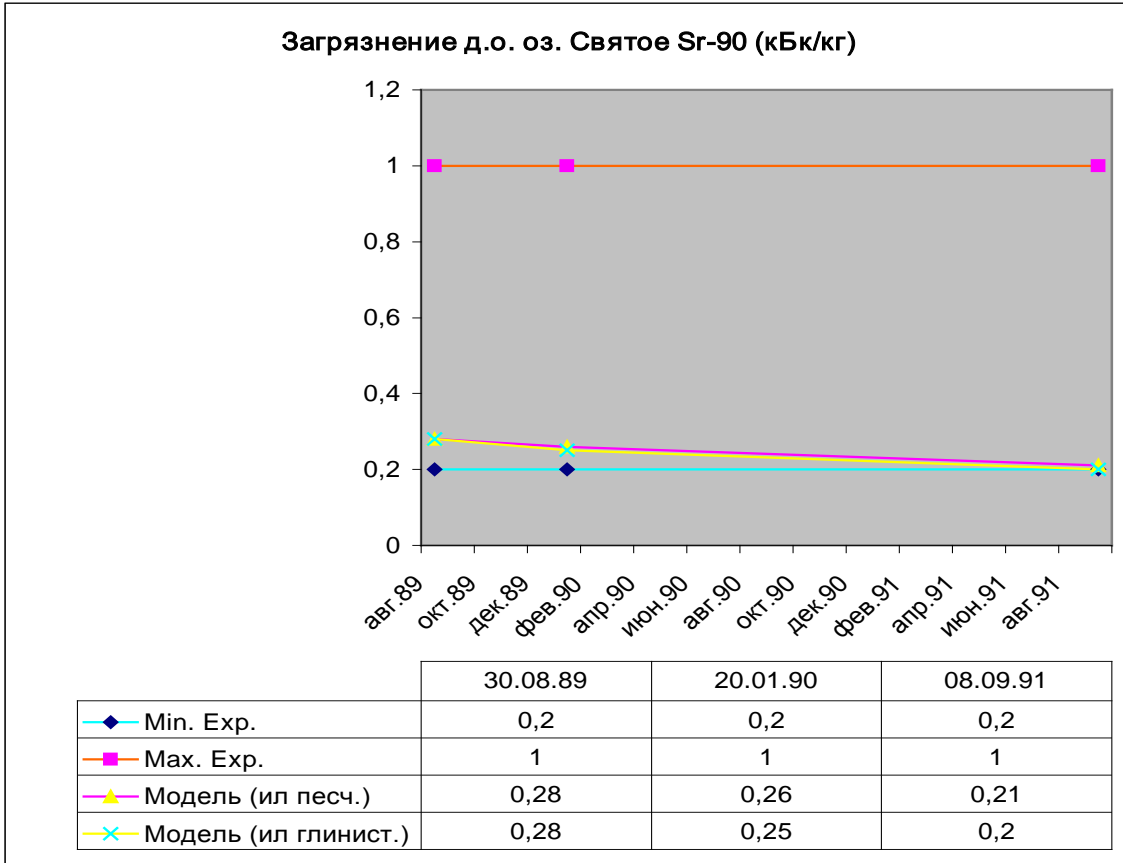


Рис. 10. Загрязнение ^{90}Sr д.о. оз. Святое (кБк/кг)

Видно, что модель в основном правильно отражает экспериментальные результаты. Тем не менее в некоторых экспериментальных точках наблюдаются несоответствия, которые можно отнести к недостаточному экспериментальному материалу относительно параметров и коэффициентов, использующихся в модели, погрешностям полевых измерений и недостаткам самой модели.

Bracciano lake

Проводилось также сравнение экспериментальных результатов [4] с результатами моделирования аварийного радиоактивного загрязнения водоема с использованием изложенной модели. В модель закладывались следующие морфометрические параметры озера Bracciano: площадь водосбора - 146,7 км², площадь поверхности воды - 57 км², средняя глубина - 89 м, потери воды 101088 м³/день. Средняя плотность загрязнения озера и водосбора ^{137}Cs после Чернобыльской аварии бралась равной 900 Бк/м².

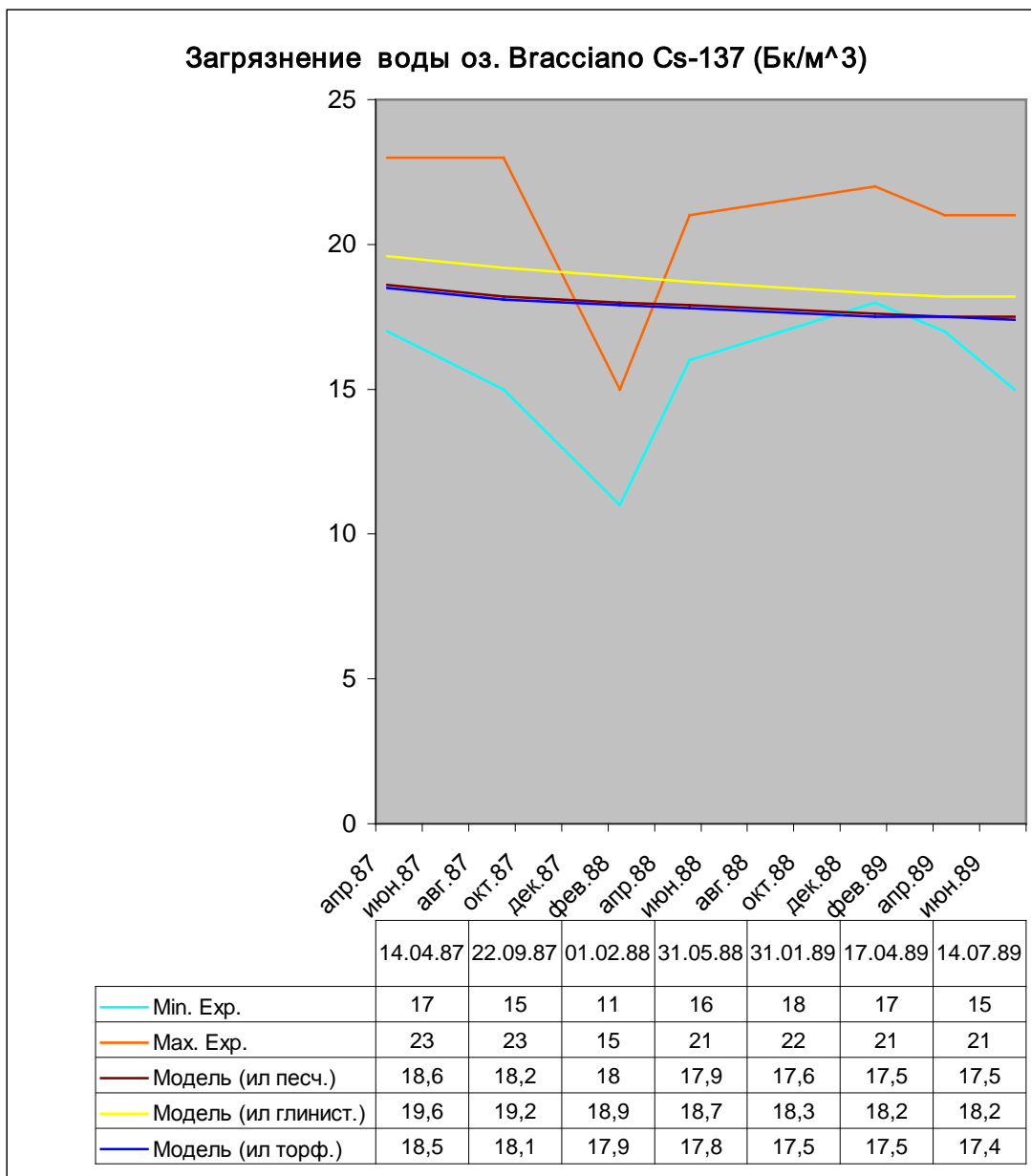


Рис. 11. Загрязнение ¹³⁷Cs воды оз. Bracciano (Бк/м³)

Легко заметить, что результаты, полученные при преимущественном типе донных отложений – глинистом иле, наиболее близко совпадают с измеренными результатами на срок прогноза - больше года после выпадений. Сравнение достаточно условно, поэтому за период времени меньше года не проводились, так как модель не учитывает температурную стратификацию озера, что на самом деле, сильно сказывается на первоначальном перераспределении радионуклидов. Тем не менее, по результатам этого и следующего сравнения можно сделать вывод о применимости данной модели даже к стратифицированным водоемам при составлении среднесрочного и долгосрочного прогнозов.

В) В работе [5] представлена динамическая модель миграции цезия в озерах, с учетом их водосборов. Модель является пятикамерной - водосбор, эпилимнеон, гиполимнеон, взвесь, рыба.

В работе также представлены данные по загрязнению озер Эствейт и Виндермер (Esthwaite and Windermere) в результате Чернобыльской аварии. С этими данными и проводилось сравнение компьютерной модели, описанной в данной работе.

Характеристики озер.

	Эствейт	Виндермер
Площадь водосбора (км ²)	17,1	168,7

Площадь зеркала (км ²)	1,004	8,046
Объем озера (м ³)	6440000	201800000
Сток воды (м ³ /с)	0.5	10.9
Скорость осаждения (м/с)	$2.3 \cdot 10^{-6}$	$5.8 \cdot 10^{-6}$
Скорость заиления (м/с) *	$3.0 \cdot 10^{-10}$	$1.9 \cdot 10^{-10}$
Среднее загрязнение цезием (Бк/м ²)	1715	1715

Таблица 1. Характеристики озер

* Скорость заиления по данным работы вызывает сомнения.

Исходя из данных статьи, был выбран тип донных отложений *ил торфянистый*

Озера Esthwaite и Windermere

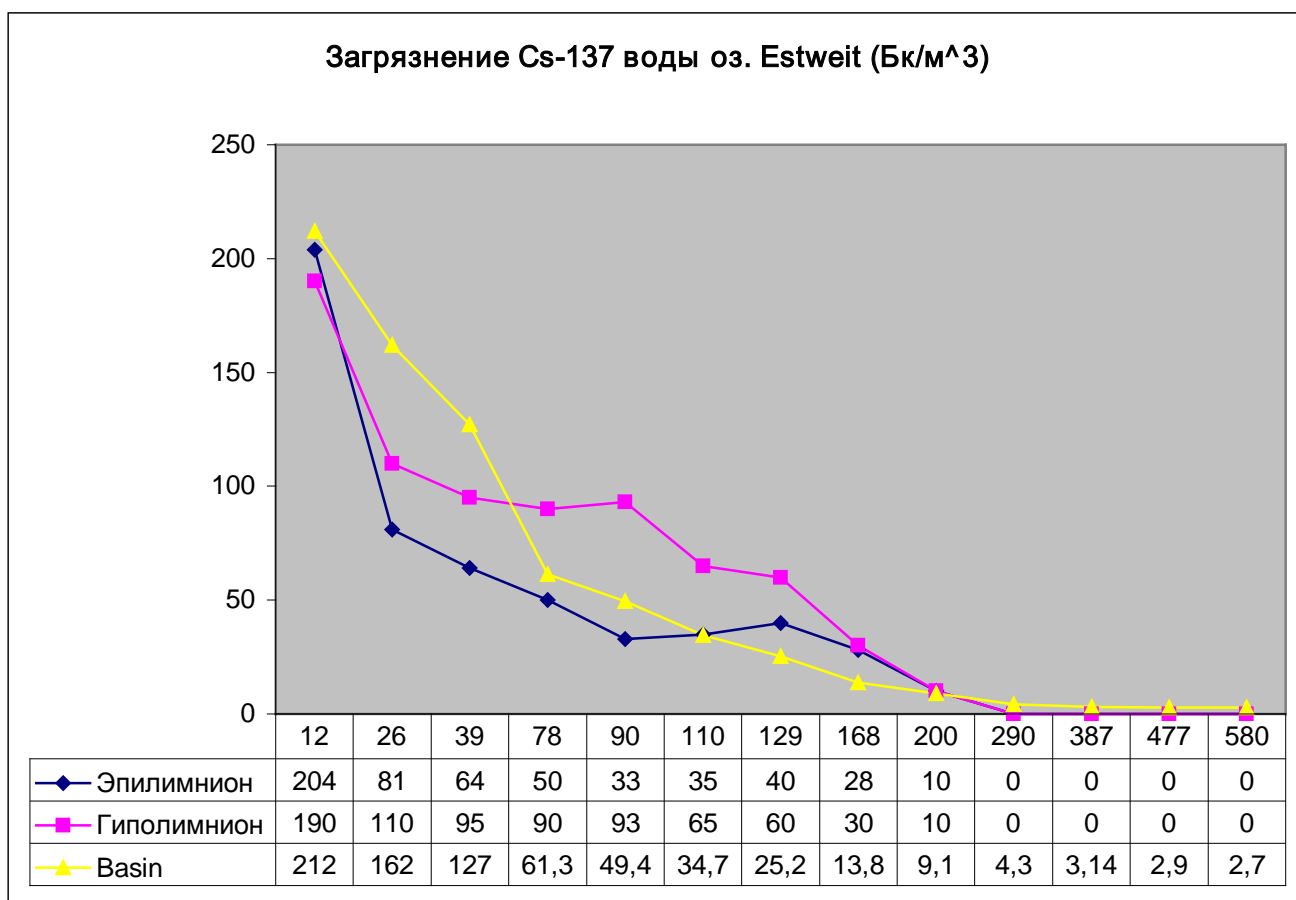


Рис. 12. Загрязнение ¹³⁷Cs воды оз. Estweit (Бк/м³)

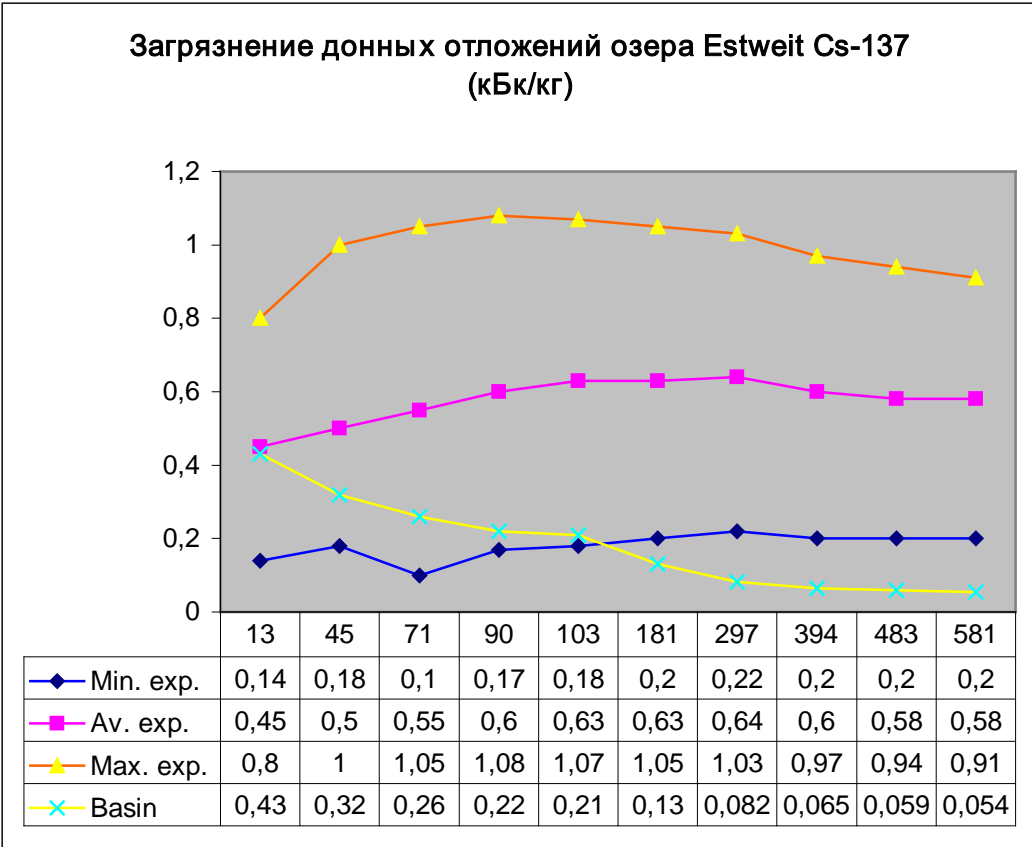


Рис. 13. Загрязнение ¹³⁷Cs д.о. воды оз. Estweit (кБк/кг)

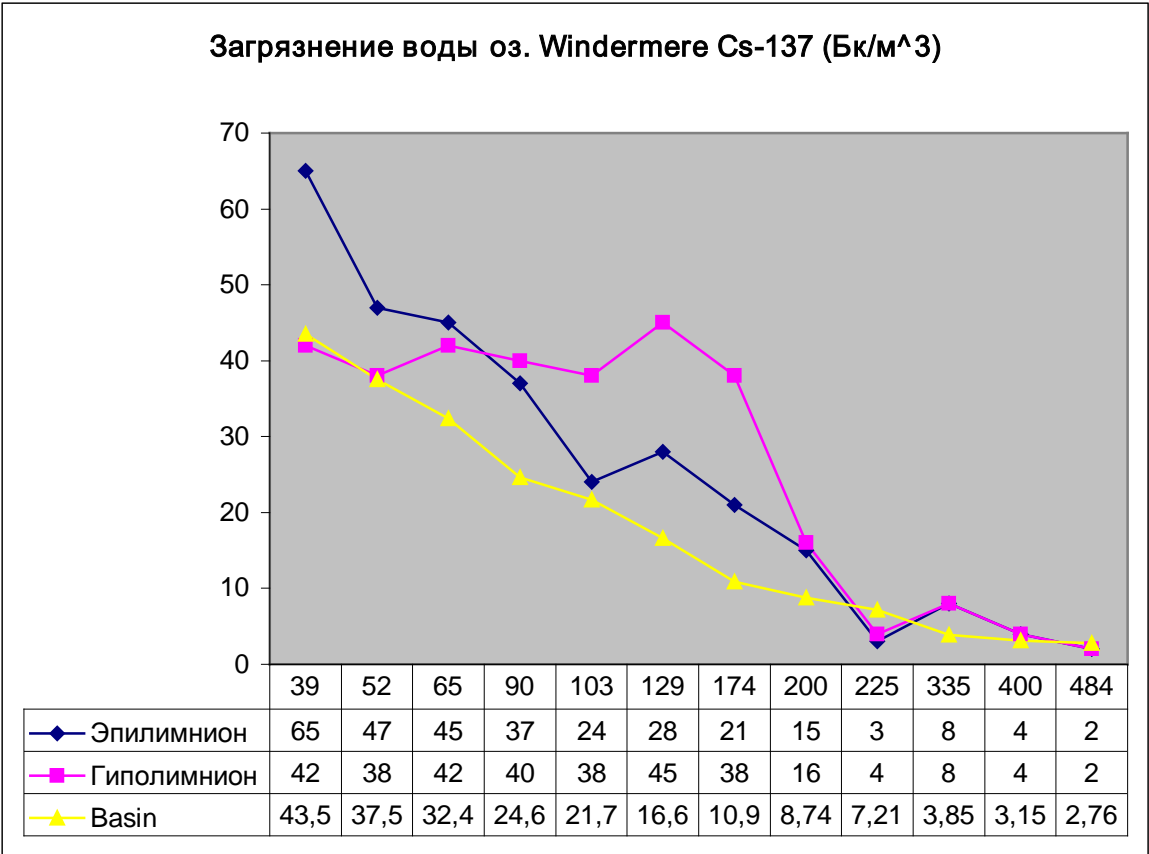


Рис. 14. Загрязнение ¹³⁷Cs воды оз. Windermere (Бк/м³)

Рис. 15. Загрязнение ¹³⁷Cs д.о. воды оз. Windermere (кБк/кг)

По этим таблицам и диаграммам видно, что результаты моделирования находятся в хорошем согласии с результатами полевых измерений.

Анализ соответствия моделей включенных в систему рекомендациям НКДАР ООН и требованиям Норм Радиационной Безопасности НРБ-99

Выход в 1999 году новой редакции Норм Радиационной Безопасности сделал необходимым проанализировать соответствие моделей включенных в систему (прежде всего модели Inter) новым нормативным требованиям, изложенным в НРБ-99. Ранее система была построена исходя из требований предыдущей редакции Норм Радиационной Безопасности НРБ-99. Также было проанализировано соответствие моделей включенных в систему на соответствие рекомендациям НКДАР ООН [6].

Общее построение системы

НКДАР ООН описывает атмосферные (локальные, региональные и глобальные), водные (реки, озера, океаны), а также наземные модели переноса.

Если можно измерить мощность поглощенной дозы в воздухе за счет радионуклидов, находящихся в окружающей среде в достаточном количестве мест и в течение достаточно продолжительного времени, то поглощенные дозы для индивидуумов и популяций за счет внешних источников излучения могут быть рассчитаны без привлечения моделей переноса в окружающей среде, описывающих пути попадания радионуклидов из источников в воздух или в отложения. Аналогичным образом, если концентрации активности радионуклидов в органах или тканях могут быть измерены у достаточного количества людей, то поглощенные дозы за счет инкорпорированных радионуклидов могут быть рассчитаны с использованием только дозиметрических моделей, без привлечения моделей переноса в окружающей среде.

Несколько менее прямые оценки доз от внутренних источников могут быть сделаны на основе измерения концентраций активности радионуклидов в воздухе или в продуктах питания. В этом случае необходимой дополнительной информацией являются скорость поступления радионуклидов из воздуха или из продовольствия и соответствующие дозиметрические модели, обеспечивающие расчет поглощенных доз в органах или тканях в результате поступления радионуклидов в организм.

Иногда прямые измерения нельзя реализовать практически. В этих случаях требуются модели для определения доз и дозовых распределений по данным о величинах и скоростях поступления радионуклидов в окружающую среду. Как правило, модели окружающей среды, рассматриваемые Комитетом, являются упрощенным математическим описанием действительных процессов переноса. Некоторые из этих процессов изучены достаточно хорошо и могут быть адекватно описаны с помощью математических моделей, которые основаны на результатах экспериментальных исследований.

Тип использованной модели зависит от требуемой информации, от характеристик радионуклидов и способов их поступления в окружающую среду.

Эти модели переноса являются примерами такого типа моделей, в которых цепь событий представлена рядом камер, и процессы переноса осуществляются между камерами - их называют "камерными моделями". В некоторых случаях понятию "камера" придается некоторый физический смысл, например, она должна представлять данный объем воды, но это необязательное требование. Другими примерами таких моделей являются модели пищевых цепей и некоторые океанические модели. Некоторые камерные модели больше подходят для прогнозирования равновесных условий, хотя многие из них применимы в динамических условиях.

Другой тип модели - это модель, в которой делается попытка физически представить реальный процесс переноса. Примерами таких моделей являются диффузионные и адвекционные модели для морей, модели переноса осадков в реках и модели траекторий распространения в атмосфере. Хотя эти модели часто используются для получения результатов при установившемся равновесии, многие из них могут давать результаты в зависимости от времени.

В соответствии с подходом, изложенным в [6], система при проведении прогнозирования опирается на те экспериментальные данные, которые позволяют производить наиболее прямую оценку. Например, если есть экспериментальные данные о загрязнении рыбы, то можно использовать их непосредственно при прогнозировании дозовых нагрузок, а не оценивать, основываясь на информации о загрязнении воды,

если есть данные о дозовых нагрузках, то их можно (и нужно) непосредственно использовать для оценки рисков и выработке рекомендаций и т.д.

Следуя принципу установленному в [6] в систему из всех моделей отбирались наиболее простые из всех, применимых для данного радионуклида, способа поступления и распространения в окружающей среде и дающих требуемые результаты.

Существует тенденция воспринимать значения, получаемые сложными методами моделирования, некритически и приписывать большую точность прогнозируемым величинам, чем это оправдано.

Модели для простых водоемов (Basin)

Модель Basin, по сути, является развитием камерной модели для изолированных водоемов, использованной НКДАР ООН. В [6] она признана применимой для изолированных водоемов типа озер, но может использоваться и как приемлемое приближение для относительно изолированных хорошо перемешивающихся частей больших водоемов.

Дозиметрические модели, модели оценки риска (Inter)

При оценке рисков модель Inter исходит (как и НКДАР ООН) из основополагающего допущения о прямой пропорциональной зависимости между соответствующими дозами и вероятностью возникновения эффектов (рак или генетические заболевания) при относительно низких уровнях дозы и мощностях дозы, которые главным образом и рассматриваются в данном докладе. Эта гипотеза применима, когда речь идет о больших популяциях, включающих людей обоих полов и разных возрастов, а не к отдельному индивидууму. Константа пропорциональности меняется для различных органов или тканей тела.

В то же время необходимо внимательно исследовать условия облучения и убедиться, что отсутствие учета некоторой части неблагоприятных эффектов для здоровья не может привести к заведомо ошибочным оценкам ожидаемых неблагоприятных последствий. Такая ситуация может иметь место, например, в случаях, когда облучению подвергаются некоторые определенные органы, такие как кожа или щитовидная железа, и видно, что это имеет отношение к возникновению опухолей, даже если большая часть возникших опухолей не приводит к смертельному исходу. Модель Inter пригодна для учета всех этих факторов.

Имеются некоторые последствия для здоровья, которые проявляются при превышении дозы определенного порогового значения и для которых клиническая тяжесть последствий облучения зависит от дозы. Эти последствия для здоровья названы МКРЗ "нестохастическими". Для другого класса последствий для здоровья, например для индуцированного рака, наличие порогового значения дозы и зависимости тяжести последствий облучения от дозы не является очевидным. Эти последствия для здоровья названы МКРЗ "стохастическими". На современном уровне знаний приемлемое предположение заключается в том, что увеличение дозы облучения влечет за собой увеличение вероятности последующих "стохастических" эффектов для здоровья. Поэтому для индивидуума уровень облучения может являться показателем предполагаемой вероятности возникновения стохастических эффектов для здоровья. Такой показатель может быть найден, принимая во внимание соответствующее соотношение доза-эффект, для рассматриваемого последствия для здоровья.

Помимо оценки поглощенных доз, приходящиеся на важные ткани (например, гонады, легкие и костный мозг) Inter (как и рекомендовано НКДАР ООН) объединяет дозы во всех органах и тканях, выражая дозу в виде так называемой "эффективной эквивалентной дозы". Такое выражение дозы, согласно [6] лучше характеризует весь риск, которому подвергаются облученные контингенты. Для этого необходимо, чтобы "вес", придаваемый облучению какой-либо конкретной части тела, был пропорционален риску возникновения стохастических эффектов на основе сопоставления с эффектами, которые следует ожидать от общего облучения всего тела той же эквивалентной дозой.

Еще один аспект связан с тем, что оценки доз основываются на поступлении и перераспределении радионуклидов в теле, а не на результатах измерения концентрации активности в тканях. При оценке эквивалентных доз за счет радионуклидом, содержащихся в выбросах предприятий ядерной энергетики, сделать это, как правило, невозможно. Поэтому расчеты основаны на результатах оценок поступления радионуклидов в организм, и делается это с использованием методов МКРЗ. В этом модель Inter действует так же, как и модели использованные НКДАР ООН.

Модели реки

Модели речных систем являются либо продолжением однокамерной модели, описанной выше, либо попыткой представить физические процессы перемешивания. Большая группа моделей последнего типа основана на решениях уравнений диффузии/адвекции, в которых учитываются скорость и диффузия в направлении движения воды, скорости поступления активности в точке сброса и уменьшение активности за счет радиоактивного распада, а также таких процессов, как сорбция в донных отложениях. Большинство практически разработанных моделей не включают все эти процессы, хотя они могут трактовать один или более элементов с большей детализацией.

В другой большой группе моделей реки делятся на систему сообщающихся камер, связанных между собой коэффициентами переноса. Модель, которая включает трактовку взаимодействия с речными отложениями и используется не просто как метод удаления активности, но и учитывает перенос загрязненных речных отложений вниз по течению, разработана Национальным советом по радиологической защите Соединенного Королевства совместно с Комиссариатом по атомной энергии Франции. Эта модель предполагает прямоугольное сечение реки, пренебрегает эффектом диффузии и, таким образом, упрощает вычисление до системы взаимосвязанных дифференциальных уравнений первого порядка. Их решение для равновесных условий показывает экспоненциально убывающую концентрацию радионуклидов в воде вниз по течению от точки поступления и пики концентрации радионуклидов в донных и взвешенных осадках в местах вниз по течению, которые зависят от скоростей переноса донного отложения и взвешенного осадка. Эта модель используется НКДАР ООН. Модель основывается на измерениях, показывающих, что усредненная за большой период концентрация активности в поперечном сечении хорошо перемешиваемой воды в реке уменьшается экспоненциально с расстоянием от точки поступления.

Модели такого типа разработаны только для условий, усредненных за длительный период времени (не менее года). Попыток учесть сезонные изменения, такие как весенние паводки или засухи, не делалось. Результаты расчетов по этой модели представляют собой концентрации активности в воде и во взвешенных отложениях в зависимости от расстояния от точек сброса активности, а также количества активности в донных отложениях в зависимости от расстояния и времени.

Модель, включенная в систему [7] в целом аналогична модели использованной НКДАР ООН. Отличия заключаются в том, что модель [6] учитывает диффузию, но не учитывает миграцию радионуклидов с донными отложениями.

Океанические модели

В некоторых случаях, когда измерены концентрации активности радионуклида, как это имеет место в отношении многих природных радионуклидов, нет необходимости моделировать процессы, приводящие к некоторым распределениям активности. В других случаях, особенно когда радионуклиды поступают в окружающую среду в виде локального выброса, а не из распределенного источника, концентрация активности может изменяться в пространстве и времени столь значительно, что требуются сложные модели для оценки либо индивидуальных, либо коллективных доз.

Хотя основными процессами перемешивания в морях и океанах также являются адвекция и диффузия, главное различие в моделировании поведения радионуклидов связано с размерами водоемов. Физические процессы перемешивания в морях были предметом широких многолетних исследований, и большинство океанографов при разработке моделей для описания дисперсионных процессов и процессов разбавления отдают предпочтение физическим моделям. Многие из них являются моделями диффузионного типа, хотя некоторые включают член, отражающий адвекцию, и позволяют учесть эффекты смещения, зависящие от вызванного ветром изменения средних скоростей, различного для разных глубин. Во многих ситуациях в морях существует тенденция к вертикальному расслоению, а в прибрежных участках морей глубина по сравнению с горизонтальной протяженностью мала, так что часто можно считать, что воды хорошо перемешиваются по вертикали, в этих случаях вполне удовлетворительной обычно является трактовка с рассмотрением одно- или двумерной дисперсии. Многие такие расчеты начинаются с решения уравнения радиально-симметричной горизонтальной диффузии вещества, внесенного мгновенно в некоторую точку бесконечно протяженного моря. Решения этого уравнения радиальной диффузии можно затем объединить с членами, отражающими адвекцию, полученными в результате эмпирических наблюдений или теоретически. На практике может оказаться разумным для математического удобства пренебречь диффузией в направлении среднего потока.

Модель на основе РОМ позволяет производить моделирование течений (горизонтальных и вертикальных) в сложных водоемах, а также перенос радионуклидов с учетом (или без учета) процессов сорбции,

десорбции, адвекции и диффузии. Модель, в зависимости от конкретного водного объекта может работать в двумерном (приближение мелкой воды) и трехмерном режиме.

Выводы

Итак, модели, включенные в систему Cassandra, и построение системы в целом находится в соответствии с выводами и рекомендациями доклада Научного комитета Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации [6] и полностью согласуются с соответствующими моделями, предложенными в [6].

Возможности практического применения

Нами был проведен анализ водоемов охладителей действующих в РФ АЭС на предмет определения пригодности моделей, включенных в систему "Cassandra" для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения радионуклидами водоема охладителя.

Определим условия применимости моделей для прогнозирования следующие:

Модель для простых водоемов Basin

Основные положения и допущения при построении модели прогноза.

1. Радиоактивные вещества, внесенные в водоем, распределяются по всему объему водной массы мгновенно и равномерно.
2. Механизмы переноса радионуклидов в водоеме описываются реакциями первого порядка с постоянными коэффициентами.
3. Миграция радионуклидов на взвеси полидисперсного гранулометрического состава описывается процессами, определяемыми монодисперсной взвесью характерного размера с эквивалентными сорбционными свойствами.
4. Процессы сорбции, десорбции радионуклидов взвесью и донными отложениями мгновенны, обратимы и описываются линейной изотермой с постоянным коэффициентом распределения k_d .
5. Динамические факторы (течения) на величину диффузионного коэффициента массообмена радионуклидов не влияют.
6. Предполагается, что донные отложения, участвующие в процессах обмена, являются средой с изотропными сорбционными и водно-физическими свойствами. В процессах взаимодействия с водой главную роль играет эффективный слой донных отложений, мощность которого определяется экспериментально.
7. Активность биомассы, по сравнению с содержанием радионуклидов в донных отложениях, пренебрежительно мала.

Результаты проведенной верификации компьютерной модели, анализ характеристик водоемов-охладителей АЭС, а также ряд исследований и экспериментальных данных [1, 2, 6, 8] Basin показывают, что для простых небольших слабопроточных водоемов, расположенных в равнинных районах России, условия 2-7 выполняются.

Можно также принять (и результаты верификации это подтверждают), что условие 1 также выполняется при прогнозировании на средние и длительные промежутки времени.

Модель требует минимум информации о водоеме: средняя глубина водоема, площадь зеркала, площадь водосбора (необходима лишь для учета смыва радионуклидов с водосбора), расход проточных вод, потери воды на фильтрацию, скорость седиментации, а также ряд характеристик коэффициент массообмена, объемная масса скелета и др. (полный список см. в [1]), которые в случае недостаточности информации могут быть оценены исходя из типа донных отложений в водоеме.

Итак, условие применимости компьютерной модели Basin для прогнозирования поведения радионуклидов в конкретном водоеме можно сформулировать следующим образом: простой, небольшой слабопроточный водоем, по которому может быть собраны данные, перечисленные выше.

Модель для сложных водоемов на основе Princeton Ocean Model (POM)

Поскольку модель строится индивидуально для каждого водного объекта, поскольку модель позволяет учитывать все существенные процессы (влияние распределения температур и солености на поле скоростей, перенос радионуклидов в растворенном виде, перенос радионуклидов на взвеси, ...), а также отказываться от несущественных учета процессов, то условия применимости в окончательном виде формулируются для конкретной модели построенной для конкретного водоема. Однако, в общем виде эти требования можно сформулировать следующим образом:

1. Отказ от учета того или иного процесса (например, переноса радионуклидов на взвеси) должен быть обоснован.
2. Все необходимые данные для расчетов по модели должны быть доступны. Конкретный набор данных (батиметрия, ветры, донные отложения, широта, долгота, ...) определяется в зависимости от построенной для конкретного водоема модели. Это требование и является, по существу самым критическим.
3. Должны быть корректно заданы граничные и начальные условия.

Модель реки

Основные допущения и предположения, сделанные при построении модели следующие:

1. Концентрации радионуклидов, а также все характеристики реки усреднены по поперечному сечению реки. То есть перемешивание в русле реки в направлении перпендикулярном течению происходит мгновенно и равномерно.
2. Масштаб усреднения вдоль реки будем считать много большим ширины реки.
3. Миграция радионуклидов на взвеси полидисперсного гранулометрического состава описывается процессами, определяемыми монодисперсной взвесью характерного размера с эквивалентными сорбционными свойствами.
4. Процессы сорбции, десорбции радионуклидов взвесью и донными отложениями мгновенны, обратимы и описываются линейной изотермой с постоянным коэффициентом распределения K_d .
5. Динамические факторы (течения) на величину диффузионного коэффициента массообмена радионуклидов не влияют.
6. Предполагается, что донные отложения, участвующие в процессах обмена, являются средой с изотропными сорбционными и водно-физическими свойствами. В процессах взаимодействия с водой главную роль играет эффективный слой донных отложений, мощность которого определяется экспериментально.
7. Активность биомассы, по сравнению с содержанием радионуклидов в донных отложениях, пренебрежительно мала.

Можно принять, что условие 1 также выполняется при прогнозировании на средние и длительные промежутки времени. Можно, также, принять, что условие 2 выполняется при прогнозировании на средние и длительные промежутки времени для рек расположенных в равнинных районах России. Выполнимость условий 3-7 подтверждается верификацией компьютерной модели Basin, а также рядом исследований и экспериментальных данных [1, 2, 6, 8]

Модель требует минимум информации о реке (данные о реке представляют из себя значения характеристик в некотором наборе створов): средняя глубина, ширина, расход проточных вод, скорость седиментации, а также ряд характеристик коэффициент массообмена, объемная масса скелета и др. (аналогично модели Basin), которые в случае недостаточности информации могут быть оценены исходя из типа донных отложений в водоеме.

Итак, условие применимости компьютерной модели River для прогнозирования поведения радионуклидов в конкретном водоеме можно сформулировать следующим образом: простой, небольшой слабопроточный водоем, по которому может быть собраны данные, перечисленные выше.

Приведем краткие данные по АЭС, действующим в России.

1. Ростовская АЭС. Проект Ростовской атомной станции относится к серии унифицированных проектов с водо-водяными реакторами корпусного типа ВВЭР-1000/тип В-320/. Каждый из энергобло-

ков мощностью по 1000 МВт располагается в отдельно стоящем главном корпусе. Наличие герметичной и прочной защитной оболочки реакторов ВВЭР, укрывающей весь первый контур и активную зону реактора, стало общепринятой мировой практикой и полностью исключает возможность серьезных, и уж тем более катастрофических, последствий аварий. Основным источником водоснабжения Ростовской АЭС является пруд-охладитель, предназначенный для охлаждения конденсаторов турбин и вспомогательного оборудования. Он создан на акватории приплотинного плеса Цимлянского водохранилища путем отсечения его прибрежного участка глухой дамбой длиной 9,8 км. Площадь пруда — 18 кв. км, и он относится к водоемам непроточного типа. Для пополнения потерь воды в качестве водоисточника используется Цимлянское водохранилище, откуда вода закачивается береговой насосной станцией по мере необходимости. Для собственных нужд атомная станция использует в год примерно 4,6 млн. кубических метров воды из пруда-охладителя, еще около 39 млн. куб. м безвозвратно теряются с его поверхности вследствие испарения. Однако все эти безвозвратные потери воды составляют всего лишь 0,25% от притока в Цимлянское водохранилище по реке Дон. На уровень водохранилища отбор воды в пруд в объеме около 60 млн. куб. м в год не оказывает практически никакого воздействия. Система оборотного водоснабжения включает в себя пруд-охладитель, образованный отсечением части Цимлянского водохранилища реки Дон дамбой, подводящий и отводящий каналы, насосные станции, систему охлаждения воды ответственных потребителей на независимых брызгальных устройствах, расположенных на площадке РосАЭС.

2. Ленинградская атомная электростанция (ЛенАЭС) является головной энергетической установкой с четырьмя кипящими уран-графитовыми реакторами канального типа РБМК-1000. Суммарная мощность станции 4000 МВт. Проектная годовая выработка электроэнергии - 28 млрд. кВт. ч. Система оборотного водоснабжения (объем потребления морской воды - около 0,5 куб. км/месяц на АЭС в целом или по 0,12 - 0,13 куб. км/месяц на каждый энергоблок) предназначена для конденсации отработанного пара турбоустановок и охлаждения технологического оборудования АЭС и включает в себя: морской водоем - охладитель - участок Копорской губы Финского залива площадью 55 кв. км со средней глубиной 6м. насосную станцию технического водоснабжения, подводящий и отводящий каналы. Система хозяйственного и противопожарного водоснабжения включает в себя: основной открытый водоисточник, расположенный на реке Сисе, обслуживаемый гидротехническим цехом ЛенАЭС, - 50000 м³/сутки, резервный открытый водоисточник, расположенный на реке Коваш, обслуживаемый гидротехническим цехом ЛенАЭС, - 7000 м³/сутки. Отвод воды с промплощадки ЛенАЭС, оцениваемый в 0,2 куб. км, обеспечивается системами: промливневой канализации, отводящей ливневую воду с территории АЭС в Копорскую губу Финского залива; замасленные и замазученные воды проходят очистку на очистных сооружениях и очищенными отводятся в Копорскую губу; хозяйственные стоки и нерадиоактивные дебалансные воды проходят очистку на очистных сооружениях хозяйственных стоков промплощадки и отводятся в Копорскую губу.
3. Нововоронежская АЭС – первая АЭС в бывшем СССР с реакторами типа ВВЭР, в которых замедлителем нейтронов и теплоносителем является вода. Всего на Нововоронежской АЭС сооружено пять энергоблоков. Строительство АЭС началось в 1957 г. 30 сентября 1964 г. введен в эксплуатацию первый энергоблок электрической мощностью 210 МВт. Каждый из пяти реакторов станции является головным - прототипом серийных энергетических реакторов: энергоблок 1 с реактором ВВЭР-210, энергоблок 2 с реактором ВВЭР-365, энергоблоки 3, 4 с реакторами ВВЭР-440, энергоблок 5 с реактором ВВЭР-1000. В настоящее время в эксплуатации находятся 3 энергоблока, из них 2 оснащены реакторами ВВЭР-440 (блоки 3 и 4), 1 - реактором ВВЭР-1000 (блок 5). Два опытно-промышленных блока ВВЭР первой очереди (блоки 1 и 2) в настоящее время выведены из эксплуатации. Суммарная установленная мощность АЭС по состоянию на 01.01.94г. составляет 1834 МВт эл. Источником технического водоснабжения НВоАЭС является р. Дон. Охлаждение конденсаторов турбин осуществляется на блоках №3,4 с помощью градирен башенного типа, на энергоблоке №5 – с помощью пруда-охладителя, имеющего площадь около 5,0 км². Система хозяйственного и противопожарного водоснабжения включает в себя артезианский отбор промзоны. Имеются три концевых выпуска в р. Дон для сброса отработанных нормативно-чистых вод циркуляционных систем. Сброс очищенных дебалансных вод, вод душевых из санпропускников и фекальных вод из реакторных отделений через указанные выпуски в р. Дон и пруд- охладитель не производится. Через концевой выпуск № 6 на поля фильтрации НВоАЭС сбрасываются: очищенные от радиоактивного загрязнения, прошедшие дозиметрический контроль дебалансные воды СВО с концентрацией суммы бета-излучающих радионуклидов, не превышающей ДК_б; сточные

воды БОУ блока № 5, прошедшие дозиметрический контроль, с концентрацией суммы бета-излучателей, не превышающей ДК_б; воды душевых санпропускников и воды “чистых” отделений спецпрачечной, не проходящие по проекту очистку и дозиметрический контроль; “чистые” хозяйственные стоки с промплощадки НВоАЭС и предприятий, расположенных в санитарно-защитной зоне НВоАЭС.

4. Кольская АЭС состоит из четырех энергоблоков мощностью 440 МВт каждый (2 блока ВВЭР-440 тип 230 -1-ая очередь и 2 блока ВВЭР-440 тип 213- 2-ая очередь). Общая мощность станции 1760 МВт (эл.). Технологическая схема КолаЭС двухконтурная с водо-водяными реакторами ВВЭР 440 . Станция состоит из четырех энергоблоков мощностью 440 МВт каждый. Каждый блок АЭС имеет два замкнутых контура. Первый контур содержит реактор; циркуляционные петли, в каждой из которых имеется парогенератор горизонтального типа; главный циркуляционный насос (ГЦН) и две главные запорные задвижки (ГЗЗ). К одной из циркуляционных петель подсоединен компенсатор давления. Второй контур включает в себя турбины, трубопроводы пара и питательной воды, подогреватели высокого и низкого давления, насосы. Циркуляционное водоснабжение КолаЭС осуществляется путем забора воды по открытому подводящему каналу из губы Глубокая Экостровской Имандры и сброса ее в губу Молочная Бабинской Имандры по открытому отводящему каналу. Хозяйственно-питьевое и противопожарное водоснабжение КолаЭС осуществляется от блочной насосной станции №1. Сброс дебалансных вод первой очереди АЭС производится через хозяйственную канализацию, сброс дебалансных вод второй очереди АЭС производится через промливневую канализацию. Производственно-дождевые, замазученные воды и хозяйственные стоки отводятся на соответствующие очистные сооружения, и после очистки сбрасываются в отводящий канал и далее в озеро Имандра.
5. Билибинская АТЭЦ является комбинированным источником электрической и тепловой энергии. Она обеспечивает энергоснабжение промышленных объектов и поселков в автономном режиме. При разработке и проектировании реакторной Билибинской АТЭЦ учитывалось наличие вечной мерзлоты и необходимости работы в изолированной энергосистеме. С 1974 по 1976гг. введены в эксплуатацию 4 энергоблока с реакторами типа ЭГП-6 (водографитовый канальный реактор) мощностью по 12 МВт.
6. Белоярская АЭС имеет установленную мощность 600 МВт и состоит из выведенной из эксплуатации I очереди и действующей II очереди. Первую очередь составляют энергоблоки №1 и 2. Энергоблок №1 с водографитовым реактором типа АМБ-100 и турбоустановкой К-100-90 электрической мощностью 100 МВт введен в эксплуатацию в апреле 1964 года. В июне 1981 года блок выведен из эксплуатации, топливо из активной зоны реактора полностью выгружено в бассейн выдержки №2. Энергоблок №2 с водографитовым реактором типа АМБ-200 и двумя турбоустановками К-100-90 электрической мощностью 200 МВт введен в эксплуатацию в декабре 1967 года. В сентябре 1989 года блок выведен из эксплуатации, топливо из активной зоны полностью выгружено в бассейн выдержки №2. Второй очередью БелАЭС является энергоблок №3 (введен в эксплуатацию в апреле 1980 года) мощностью 600 МВт с реактором на быстрых нейтронах типа БН-600 с жидкотеплоносительным теплоносителем. В блоке с реактором установлены три парогенератора ПГН-200М модульно-секционного типа и три турбоустановки типа К-200-130. Тепловая схема блока трехконтурная, трехпетлевая. В качестве теплоносителя в I и II контурах используется натрий, третий контур - пароводяной с промежуточным (натриевым) перегревом пара. Система оборотного водоснабжения (максимальный расход на потребителя составляет 95 тыс. т/час.) предназначена для конденсации отработанного пара турбоустановок и охлаждения технологического оборудования АЭС и включает в себя: - пруд-охладитель площадью 38 кв. км и объемом 265 млн. куб. метров при уровне 212 м; - подводящий канал; - береговую насосную станцию с шестью осевыми насосами; - два напорных водовода из стальных труб максимальным диаметром 2600 мм; - два закрытых отводящих канала из железобетонных секций сечением 3,5 м Е] 3,5 м, переходялами промплощадки в открытый отводящий канал. Система хозяйственного и противопожарного водоснабжения включает в себя: - Каменский водозабор подземных вод, состоящий из шести артезианских скважин, суммарной производительностью 280 куб. м /час; среднегодовая нагрузка составляет 235куб. м /час; - насосную станцию 2-го подъема с двумя подземными железобетонными резервуарами ёмкостью 300 и 500куб. м и четырьмя насосами Д-200-95; - три напорных водовода ДУ 300 подачи воды с 2-го на 3-й подъём протяженностью 8 км; - насосную станцию 3-го подъёма с тремя железобетонными резервуарами по 2000 куб. м каждый, тремя насосами питьевой воды Д-

320-70, тремя пожарными насосами ЦН-400-105, один из которых с дизельным приводом; насосная станция 3-го подъема связана водоводом ДУ 300 с насосной 4-го подъема, расположенной в г. Заречный и получающей воду с Гагарского месторождения подземных вод. С 3-го на 4-й подъем перекачивается до 120 куб. м /час воды, при необходимости возможна подача воды в обратном направлении; - кольцевую водопроводную сеть промплощадки АЭС. Отвод воды с промплощадки БАЭС обеспечивается системами: промливневой канализации, отводящей ливневую воду с территории АЭС в водохранилище; очистки на очистных сооружениях по очистке нефтесодержащих стоков замасленных и замазученных вод с отводом очищенных вод в водохранилище; очистки на очистных сооружениях хозяйственных стоков промплощадки производительностью 1060 куб. м /час хозяйственных стоков и нерадиоактивных дебалансных вод с отводом очищенных вод в Ольховское болото.

7. Курская атомная электростанция (КурАЭС) является важнейшим узлом Единой Энергетической Системы России, откуда расходятся 11 линий электропередачи: 2 линии напряжением 110 кВ, 6 линий напряжением 330 кВ, 3 линии напряжением 750 кВ. Проектная электрическая мощность Курской АЭС - 6000МВт, установленная электрическая мощность на 1.01.95г. - 4000МВт. (4 энергоблока с четырьмя кипящими уран-графитовыми реакторами канального типа РБМК-1000 по 1000МВт каждый). В настоящее время станция условно делится на I (1-й и 2-й энергоблоки) и II (3-й и 4-й энергоблоки) очереди. В 1986 г. начато сооружение пятого блока III очереди Курской АЭС. Необходимость в нем вызвана потребностями устойчивого электроснабжения Центра России. Пятый блок по своим физическим и техническим характеристикам выгодно отличается от предыдущих блоков. В состав первой очереди станции входят два энергоблока (1-й - введен в эксплуатацию в декабре 1976г. и 2-й - введен в эксплуатацию в марте 1979г.) мощностью 1000 МВт каждый, включающий в себя реактор типа РБМК-1000 тепловой мощностью 3200МВт с двумя контурами многократной принудительной циркуляции КМПЦ, паровыми и конденсатно-питательными трактами и двумя турбогенераторами электрической мощностью по 500МВт (паровая турбина типа К-500-65/3000 и генератор типа ТВВ-500-2). В состав второй очереди станции входят два энергоблока (3-й - введен в эксплуатацию в декабре 1983г. и 4-й - введен в эксплуатацию в декабре 1985г.) мощностью 1000 МВт каждый, включающий в себя реактор типа РБМК-1000 тепловой мощностью 3200МВт с двумя контурами многократной принудительной циркуляции КМПЦ, паровыми и конденсатно-питательными трактами и двумя турбогенераторами эл. мощностью по 500МВт (паровая турбина типа К-500-65 / 3000 и генератор типа ТВВ-500-2). КурАЭС расположена на берегу Курского водохранилища. Реактор и его вспомогательные системы размещены в отдельных корпусах. Машинный зал является общим на 2 энергоблока. Вспомогательные цеха и системы для двух энергоблоков являются общими и территориально расположены вблизи каждой из очередей (2 энергоблока) станции. Система оборотного водоснабжения предназначена для конденсации отработанного пара турбоустановок и охлаждения технологического оборудования АЭС и включает в себя: водоем - охладитель - Курское водохранилище с площадью зеркала 21,5 кв. км. Система хозяйственного и противопожарного водоснабжения включает в себя: водоснабжение города Курчатова осуществляется с двух водозаборов (Дичнянского и Тарасовского), расположенных соответственно в зоне наблюдения и санитарно-защитной зоне. Отвод воды с промплощадки КурАЭС обеспечивается системами: промливневой канализации, отводящей ливневую воду с территории АЭС в пруд-охладитель; замасленные и замазученные воды проходят очистку на очистных сооружениях и после очистки используются в цикле станции и на нужды химводоочистки; хозяйственные стоки и нерадиоактивные дебалансные воды проходят очистку на очистных сооружениях хозяйственных стоков промплощадки и отводятся в пруд-охладитель.
8. Смоленская АЭС включает три уран-графитовых канальных реактора кипящего типа (РБМК-1000) электрической мощностью 1000 МВт каждый. Суммарная мощность станции 3000 МВт. Станция условно делится на I и II очереди. В состав первой очереди станции входят два энергоблока (1-й - введен в эксплуатацию в декабре 1982г. и 2-й - введен в эксплуатацию в мае 1985г.) мощностью 1000 МВт каждый, включающий в себя реактор РБМК-1000 с двумя контурами многократной принудительной циркуляции КМПЦ, паровыми и конденсатно-питательными трактами и двумя турбогенераторами ТГ К-500-65 мощностью по 500 МВт каждый. В состав второй очереди станции входит один энергоблок (3-й - введен в эксплуатацию в январе 1990г.) мощностью 1000 МВт, включающий в себя реактор РБМК-1000 с двумя контурами многократной принудительной циркуляции КМПЦ, паровыми и конденсатно-питательными трактами и двумя турбогенераторами ТГ К-500-65 мощностью по 500 МВт. Реактор и его вспомогательные системы размещены в отдельных

корпусах. Машинный зал является общим на 2 энергоблока. Вспомогательные цеха и системы для двух энергоблоков являются общими и территориально расположены вблизи каждой из очередей станции. Источником технического водоснабжения станции является р. Десна с регулирующим водохранилищем-охладителем. Станция является одноконтурной и не допускает радиоактивных сбросов в окружающую среду. Насосные станции техводоснабжения являются объектами комплекса сооружений техводоснабжения и предназначены для подачи воды из водохранилища. Система технического водоснабжения выполнена по блочному принципу, т.е. техническая вода в каждый блок подается определенной группой насосов и трубопроводов. Для запитки потребителей, являющимися общими для двух блоков, а также для резервирования наиболее важных потребителей технической воды между напорными трубопроводами блоков выполнены переключки с секционирующими задвижками. Наличие переключек позволяет при авариях в системе техводоснабжения любого из блоков подать техническую воду потребителям аварийного блока от системы техводоснабжения неаварийного блока. Система техводоснабжения СмоАЭС относится к разряду оборотной системы водоснабжения с охлаждением воды, прошедшей через конденсаторную систему турбин в акватории водохранилища. Системой техводоснабжения предусматривается раздельная подача воды в конденсаторы турбин и аппаратное отделение реактора. Вода для охлаждения конденсаторов турбин подается из водохранилища циркуляционными насосами станций №1 и №3 в подводящий канал. Подача воды производится по напорным трубопроводам диаметром 2 метра. Далее вода самотеком через водозаборные сооружения подается на конденсаторы турбин. Нагретая вода сбрасывается в отводящий канал и отводится в водохранилище. В водохранилище вода охлаждается и вновь поступает к насосным станциям. В аппаратное отделение вода подается аппаратными насосными станциями №1 и №4. Подача воды из водохранилища потребителям осуществляется по напорным трубопроводам диаметром 1,2 метра, которые проложены под землей. Из реакторного отделения вода сбрасывается в общий отводной канал. В номинальном режиме работы АЭС общий расход охлаждающей воды составляет 160 куб. м /с. Хозяйственное и противопожарное водоснабжение осуществляется от трех водозаборов, расположенных к востоку, юго-востоку и юго-западу города Десногорска. Канализование жилого фонда производится через очистные сооружения, со сбросом стоков в р. Десну. Отвод воды с промплощадки СмоАЭС обеспечивается системами: промливневой канализации, отводящей ливневую воду с территории АЭС в водохранилище; замасленные и замазученные воды проходят очистку на очистных сооружениях и очищенными используются в системе оборотного водоснабжения или отводятся в водохранилище; хозяйственные стоки и нерадиоактивные дебалансные воды проходят очистку на очистных сооружениях хозяйственных стоков промплощадки и отводятся в водохранилище.

9. Калининская АЭС создана на границе двух энергетических систем - Северо-запада и Центра России с целью компенсации существующего дефицита в энергосистемах. Технологическая схема КлинАЭС двухконтурная с водо-водяными реакторами ВВЭР-1000 /тип 338/. Станция состоит из двух энергоблоков мощностью 1000 МВт эл. каждый. Общая мощность 2000 МВт эл. Время ввода: энергоблока №1 -май 1984г.; энергоблока №2 - октябрь 1986г. Система оборотного водоснабжения включает в себя водохранилища - охладители (озера Удомля и Песьво, соединенные короткой протокой). Сток воды осуществляется из о. Песьво в о. Удомля. Из о. Удомля вытекает единственный водоток - р. Съежа. Для регулирования объема воды в системе озер на р. Съеже вблизи истока построен гидроузел, что позволяет задерживать весенний сток с бассейна о. Удомля в чаше озер Удомля-Песьво. Суммарная площадь зеркала озер - 21,2 км². Регулирование стока осуществляется в интервале 154-156,25 м абс. выс., что создает регулируемый объем - 44,6 млн. м³ и гарантированную водоотдачу - 1,99 м³/с. Эта затратная величина включает: 0,5 м³/с - санитарный пропуск в р. Съежу, 0,39 м³/с - естественное испарение с зеркала озер Удомля-Песьво, 1,1 м³/с - компенсация безвозвратных потерь при работе АЭС. Система хозяйственного и противопожарного водоснабжения включает в себя: шесть артезианских скважин глубиной 30 м с общим дебитом 1500 куб. м /час (в работе четыре скважины, в резерве две скважины), расположенных в 7 км к юго-западу от промплощадки станции, озера Удомля и Песьво,- городской водопровод. Незагрязненные производственно-дождевые воды отводятся системой промышленно-ливневой канализации в озеро Удомля. Загрязненные нефтепродуктами сточные воды отводятся на установку по очистке нефтесодержащих стоков, и после очистки направляются для нужд станции или сбрасываются в сбросный канал. Бытовые стоки после полной биологической очистки и доочистки сбрасываются в озеро Песьво.
10. Балаковская АЭС - АЭС с энергоблоками нового поколения состоит из четырех энергоблоков с установленной мощностью 1000 МВт каждый, а также комплекса вспомогательных зданий и со-

оружений. Общая мощность - 4000 МВт. Технологическая схема БалаЭС двухконтурная с водяными реакторами ВВЭР-1000 /тип В-320/. Первый контур содержит реактор; циркуляционные петли, в каждой из которых имеется парогенератор горизонтального типа; главный циркуляционный насос (ГЦН) и две главные запорные задвижки (ГЭЗ). К одной из циркуляционных петель подсоединен компенсатор давления. Второй контур включает в себя турбины, трубопроводы пара и питательной воды, подогреватели высокого и низкого давления, насосы. Схема АС реактором ВВЭР. Время ввода: энергоблока №1 - декабрь 1985г.; энергоблока №2 - октябрь 1986г.; энергоблока №3 - декабрь 1988г.; энергоблока №4 - декабрь 1993г. Система оборотного водоснабжения включает в себя: пруд-охладитель, образованный отсечением мелководной части Саратовского водохранилища намывной дамбой, подводящий и отводящий каналы, насосные станции, систему охлаждения воды ответственных потребителей на трех независимых брызгальных устройствах, расположенных на площадке БалаЭС. Система хозяйственного и противопожарного водоснабжения включает в себя: две артезианские скважины глубиной 46 м с общим дебитом 85 и 53 куб. м /час, городской водопровод. Незагрязненные производственно-дождевые воды отводятся системой промышленно-ливневой канализации (ПЛК) в пруд-охладитель. Загрязненные нефтепродуктами сточные воды отводятся на установку по очистке нефтесодержащих стоков "Кристалл" и после очистки направляются на спецводоочистку или сбрасываются в отводящий канал. Хозяйственно-фекальные стоки "чистой" зоны отводятся с промплощадки на очистные сооружения г. Балаково. Хозяйственно-фекальные стоки "грязной" зоны направляются на станцию биологической очистки, и после доочистки сбрасываются в 3-й брызгальный бассейн (1ББЗ). Ливневые стоки "грязной зоны" (с кровель спецкорпуса, ХТРО и прилегающей к ним территории) без очистки сбрасываются в 3-й брызгальный бассейн (1ББЗ).

Результаты анализа пригодности моделей следующие:

1. Билибинская АЭС. Данные по АЭС и ее водоему охладителю недостаточны для определения пригодности моделей, включенных в систему для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения.
2. Ростовская АЭС. Водоем-охладитель – отгороженная часть Цимлянского водохранилища. Водоем слабопроточный. Модель Basin хорошо подходит для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения водоема охладителя. Создан настроенный на водоем-охладитель проект (в модели Basin), поставляемый вместе с системой. Однако для проведения расчетов требуется пополнение входных данных о водоеме.
3. Ленинградская АЭС. Водоем охладитель – Копорская губа Финского залива. Собрано большое количество данных по водоему охладителю (в том числе по его батиметрии), а также по окружающей территории и самой станции. Прогнозирование должно вестись с использованием модели на основе РОМ, так как модель предназначена для прогнозирования поведения радионуклидов в сложных водоемах (Копорская губа – сложный водоем), модель позволяет получать точные результаты, но требует большого количества входных данных (по водоему охладителю собраны все необходимые данные). Модель хорошо подходит для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения водоема охладителя.
4. Белоярская АЭС. Водоем охладитель (небольшой слабопроточный пруд-охладитель) хорошо удовлетворяет требованиям модели Basin. Имеются необходимые для прогнозирования по модели Basin данные. Модель хорошо подходит для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения водоема охладителя. Создан настроенный на водоем-охладитель проект (в модели Basin), поставляемый вместе с системой.
5. Нововоронежская АЭС. Водоемом охладителем для энергоблоков 3 и 4 является река Дон (прогнозирование должно вестись с использованием модели River). Река Дон – равнинная река со спокойным ровным течением хорошо удовлетворяет требованиям, предъявляемым моделью River. Для энергоблока 5 водоемом охладителем является небольшой слабопроточный пруд-охладитель, который хорошо удовлетворяет требованиям модели Basin. Имеются необходимые для прогнозирования по модели Basin данные. Модель хорошо подходит для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения водоема охладителя. Создан настроенный на водоем-охладитель проект (в модели Basin), поставляемый вместе с системой.
6. Кольская АЭС. Водоемом охладителем является озеро Имандра. По всей гидросфере Кольского полуострова (в том числе по озеру Имандра) собрано большое количество данных. Озеро удовле-

творят требованиям модели Basin. Имеются все необходимые для прогнозирования по модели Basin данные. Модель подходит для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения водоема охладителя. Создан настроенный на водоем-охладитель проект (в модели Basin), поставляемый вместе с системой.

7. Курская АЭС. Водоемом охладителем является Курское водохранилище. Водоем охладитель хорошо удовлетворяет требованиям модели Basin. Модель хорошо подходит для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения водоема охладителя. Создан настроенный на водоем-охладитель проект (в модели Basin), поставляемый вместе с системой. Однако для проведения расчетов требуется пополнение входных данных о водоеме.
8. Смоленская АЭС. Водоемом охладителем является водохранилище на реке Десне. Водоем охладитель хорошо удовлетворяет требованиям модели Basin. Модель хорошо подходит для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения водоема охладителя. Создан настроенный на водоем-охладитель проект (в модели Basin), поставляемый вместе с системой. Однако для проведения расчетов требуется пополнение входных данных о водоеме.
9. Калининская АЭС. Водоемами охладителями являются озера Удомля и Песьво. Они хорошо удовлетворяют требованиям модели Basin. Имеются необходимые для прогнозирования по модели Basin данные. Модель хорошо подходит для прогнозирования последствий нормативного и аварийного загрязнения водоема охладителя. Создан настроенный на водоем-охладитель проект (в модели Basin), поставляемый вместе с системой.
10. Балаковская АЭС. Водоемом охладителем является пруд-охладитель, образованный отсечением мелководной части Саратовского водохранилища намывной дамбой. Данные о водоеме охладителе недостаточны для проведения прогнозирования, однако, они позволяют сделать вывод о применимости модели Basin для прогнозирования. Имеющиеся данные представлены в настроенном на водоем-охладитель проекте (в модели Basin), включаемый в поставку.

Данные по АЭС предоставлены Техническим Кризисным Центром ИБРАЭ РАН Концерна «Росэнергоатом».

Итак, для большинства водоемов-охладителей действующих в РФ АЭС возможно применение моделей включенных в систему (в большинстве случаев модели Basin) для прогнозирования последствий нормативного и аварийного радиационного загрязнения.

Далее приведем, для примера, расчет последствий радиационного загрязнения водоема-охладителя Калининской АЭС в результате гипотетической аварии.

Допустим, произошла гипотетическая тяжелая авария, сопровождавшаяся расплавлением активной зоны, разрушением корпуса реактора и загрязнением озер Удомля и Песьво. При оценке загрязнения и ущерба ограничимся изотопами цезия (^{134}Cs и ^{137}Cs). Пусть выброс в атмосферу составил ^{134}Cs – $1.1\text{e}+15$ Бк, ^{137}Cs $7.2\text{e}+14$ Бк. Погодные условия в момент аварии были следующие: ветер юго-восточный со скоростью 4 м/с. Шероховатость подстилающей поверхности –1 метр. Проведем прогнозирование атмосферного переноса и выпадений с помощью модели **Trace** [9].

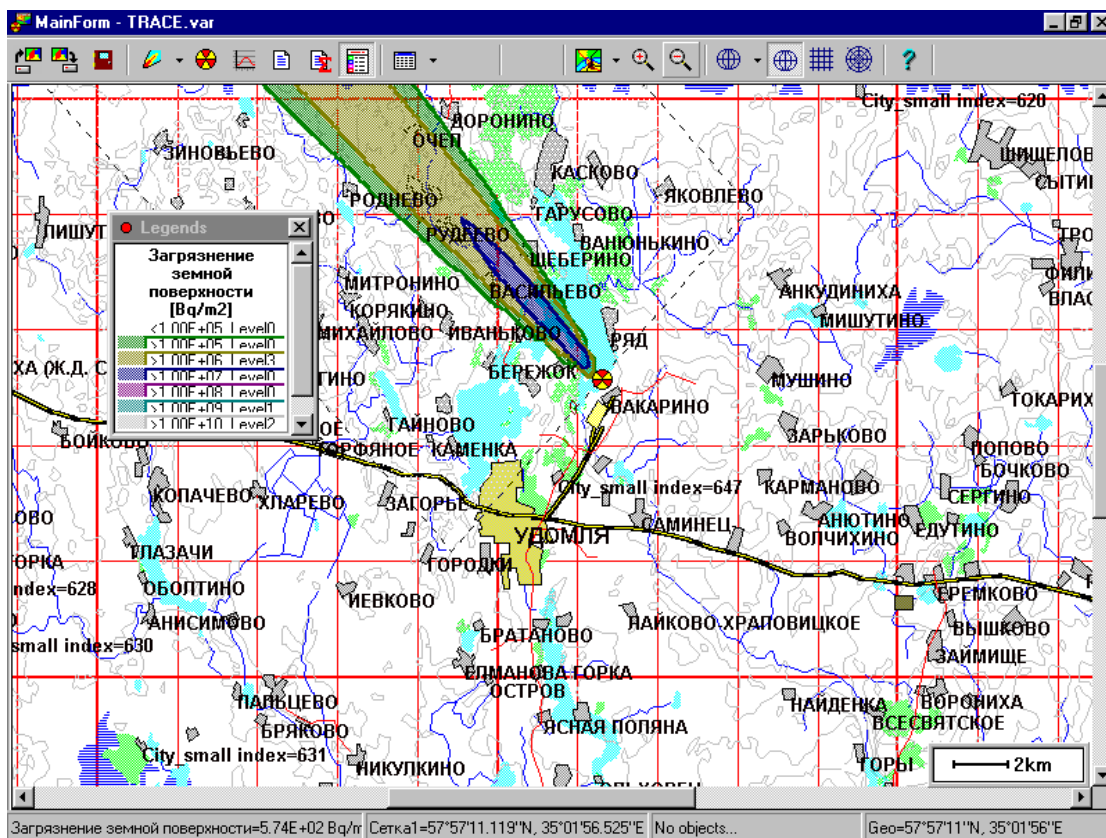


Рис.16. Окно отображения результатов Прогнозирования системы Trace

Аэрозольное выпадение на озера Удомля и Песьво составило (расчет проведен при помощи модуля **Гео спецГИС Komronovka**):

	Бк/км ²
¹³⁴ Cs	5.33e+12
¹³⁷ Cs	8.67e+12

Таблица 2. Начальное загрязнение озер

Проведя прогнозирование загрязнения на 8 дней получим следующие загрязнения:

	Вода (Бк/м ³)	Донные отложения (Бк/м ³)
¹³⁴ Cs	8.86e+5	8.33e+8
¹³⁷ Cs	1.44e+6	1.36e+10

Таблица 3. Результирующее загрязнение озер

Проведя прогнозирование дозовых нагрузок, видим, что в первые 10 дней после аварии для всех возрастных групп наблюдается превышение дозовых пределов.

Мощность эффективной эквивалентной составляет от 40 до 70 мЗв в год для различных возрастных групп. Причем дозовые нагрузки, связанные с внешним облучением дают несущественный вклад. Основной вклад дает потребление зараженной рыбы и питьевой воды. Однако уже при прогнозировании сроком на 12 месяцев не наблюдается превышения основных дозовых пределов. Следовательно, наиболее разумным методом снижения дозовых нагрузок является временное (сроком на 1 год) ограничение потребления загрязненной рыбы и питьевой воды либо временное отселение.

Список литературы

1. В.А. Воробьев, В.П. Киселев, М.Ю. Коржов, А.Л. Крылов. Замкнутая система базовых моделей и их компьютерная реализация для расчета оценки и анализа радиационной обстановки при загрязнении радионуклидами гидрологической системы (поверхностных вод). Препринт IBRAE-97-14.
2. С.В. Казаков. Управление радиационным состоянием водоемов охладителей АЭС. Киев, «Техніка», 1995.
3. Воробьев, А.В. Горбачев, М.Ф. Каневский, А.В. Носов, С.В. Панченко, Е.В. Евстратов, Ю.И. Медведь, В.А. Хитриков, Компьютерные базовые модели прогнозирования и поведения радионуклидов в водоемах при аварийных и нормативных сбросах, с учетом гидрометеорологической обстановки. Препринт NSI-36-94. Российская академия наук, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики, Москва 1994, 43с.
4. Monte, Fratarcangeli, S., Pompei, F., Quaggia, S., Andradi G., Modeling the behavior of ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{90}Sr in lake systems, (results of research carried out using radioactivity measurement data collected following the Chernobyl accident), ENEA, ISSN/0393-6309, RT/PAS/89/31.
5. McDougall, S., Hilton, J., Jenkins, A. - A dynamic model of cesium transport in lakes and their catchments, *Wat. Res.*, Vol.25, 4, pp. 437-445, 1991.
6. Ионизирующее излучение: Источники и биологические эффекты. Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации. Доклад за 1982 год Генеральной Ассамблее (с приложениями). Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк, 1982.
7. М.А. Новицкий, Модель долгосрочного переноса радионуклидов в речном русле. Метеорология и гидрология, 1993, N1.
8. Моделирование эколого-геофизических процессов миграции радионуклидов на водосборах регионов АЭС. Государственный комитет СССР по Гидрометеорологии, Всесоюзный НИИ Гидрометеорологической информации – мировой центр данных, Гидрометеорология, Серия 87. Мониторинг состояния окружающей среды, Обзорная информация, Выпуск 1, Обнинск 1990, Н.И. Крышев, И.В. Драголюбова, А.И.Бурков
9. Р.В. Арутюнян, В.В. Беликов, В.М. Головизнин, В.П. Киселев и др. “Модели распространения радиоактивных загрязнений в окружающей среде”. Известия РАН, Энергетика, вып.1, 1999, с. 61-76.