

ТРАНСФОРМАЦИЯ УЯЗВИМОСТИ ГРУНТОВЫХ ВОД К РАДИОАКТИВНОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ В ЗОНЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО СЛЕДА НА ТЕРРИТОРИИ КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ¹

© 2020 г. А.П. Белоусова, Е.Э. Руденко

Институт водных проблем РАН

Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3. E-mail: anabel@iwr.ru, belanna47@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.2020. После доработки 27.02.2020. Принята к публикации 01.03.2020

На основе ежегодно предоставляемых научно-производственным объединением «Тайфун» (2019) данных о радиационном мониторинге и областных государственных докладов (Левкина и др., 2019; Доклад о состоянии ..., 2019) проведен детальный анализ радиационной обстановки на территории России и отдельных её регионов, включающий следующие исследования: оценка проблем и перспектив атомной энергетики в стране и за рубежом; анализ мониторинга радиационной обстановки территории на примере Центрального федерального округа, включающий структуру мониторинга атомных станций (на примере Калининской, Курской, Смоленской и Нововонежской станций) и мониторинг радиационной обстановки на территориях, расположенных в зоне радиоактивного следа от аварии на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) в Калужской и Брянской областях, которые являются предметом наших исследований.

Показано, что влияние деятельности атомных электростанций (далее АЭС) на радиоактивность объектов окружающей среды в 2018 г. было невелико. Оно строго контролируется и выражается в повышенном содержании трития, повышенном региональном уровне по объемной активности ¹³⁷Cs, наличии в окружающей среде техногенных радионуклидов ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁶⁰Co, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹³¹I, отсутствующих в составе глобального фона. Объемные активности контролируемых радионуклидов в 2018 г. были значительно ниже допустимых значений, обозначенных в нормах радиационной безопасности (СанПиН ..., 2009) и не представляют опасности для здоровья населения. Однако до сих пор ярко выражены последствия техногенного загрязнения радионуклидами, попавшими в окружающую среду после аварии на ЧАЭС, что проявляется в повышенной суммарной радиоактивности поверхностных и подземных вод, почв и растительности. Отдельные территории требуют реабилитационных мероприятий. Поэтому исследования в режиме мониторинга в области радиоактивного следа ЧАЭС являются актуальными и необходимыми для более точного понимания изменения радиационного загрязнения подземных вод.

Исследование гидрогеологических условий этого региона показало, что они отличаются большим разнообразием водоносных горизонтов, как безнапорных, так и напорных, и, в целом, гидрогеологическое строение территории напоминает собой «слоеный пирог». Безнапорные водоносные горизонты включают в себя воды четвертичных (аллювиальных, гляциальных, флювиогляциальных, болотных, пролювиальных горизонтов), меловых и юрских отложений. Все эти водоносные горизонты связаны между собой и не имеют выдержанных водоупоров внутри этой толщи (комплекса). Напорные водоносные горизонты пресных подземных вод включают в себя множество связанных между собой водоносных горизонтов каменноугольного возраста. Между

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-05-00476 «Особенности трансформации радиоактивного загрязнения литосферы и подземной гидросферы в зоне чернобыльского радиоактивного следа на территории России» и № 20-55-S52003 «Экологическая безопасность АЭС при штатной и чрезвычайной ситуации с оценкой неопределенности при захоронении ядерных отходов и надежности инженерных барьерных систем» и Государственному заданию «Моделирование и прогнозирование процессов восстановления качества вод и экосистем при различных сценариях изменений климата и антропогенной деятельности» – Программа № АААА-А18-118022090104-8.

двумя этими толщами залегает выдержанный по площади верхнеюрский водоупор, разделяющий их. Ниже каменноугольных горизонтов залегают горизонты девонского, протерозойского и архейского возраста, содержащие соленые подземные воды и рассолы.

Для оценки защищенности и уязвимости подземных вод к загрязнению использовалась оригинальная авторская методика. Основные положения этой методики представлены ниже.

Защитная зона – отделяет подземные воды от поверхностного загрязнения и имеет двухуровневое строение, включающее почвы и породы зоны аэрации.

Защищенность – способность защитной зоны препятствовать проникновению загрязнения в подземные воды в течение определенного времени.

Уязвимость подземных вод к загрязнению – отношение реальной техногенной нагрузки изучаемой территории к естественной защищенности подземных вод. Вещество считается загрязняющим, если его концентрации превышают фоновые значения. Следовательно, при оценке защищенности учитывались особенности строения защитной зоны, отделяющей грунтовые воды от поверхностного загрязнения, и процессы, происходящие в ней под влиянием загрязнения.

Для оценки защищенности был построен комплект среднemasштабных карт (масштаб 1:200000) как наиболее отвечающий возможности оценить защищенность на качественном и количественном уровнях.

Карта защитной зоны получена путем совмещения почвенной карты, отображающей строение ее первого уровня, и карт, характеризующих строение второго уровня защитной зоны (глубин залегания и литологического строения зоны аэрации). На ней выделены типовые участки, характеризующиеся определенным строением первого и второго уровней и глубиной залегания грунтовых вод, описание этих типовых участков приведено в легенде к карте. Таким образом, на этой карте проведено районирование территории по особенностям свойств защитной зоны к задержанию загрязнений.

При оценке возможности загрязнения грунтовых вод радионуклидами учитываются показатели: сорбционные свойства, обеспечивающие задержание радионуклидов почвами и породами зоны аэрации; ограничение интенсивности продвижения (вплоть до полного задержания) с инфильтрационным потоком до грунтовых вод; миграционные свойства почв и пород зоны аэрации, зависящие от физико-механических, водно-физических, фильтрационных свойств и их минералогического состава и характеризующие интенсивность продвижения фронта загрязненных инфильтрующихся вод вглубь зоны аэрации до грунтовых вод; путь фильтрации (инфильтрации), т.е. мощность зоны аэрации или глубина залегания грунтовых вод; период полураспада радионуклидов.

Защищенность грунтовых вод от любого загрязняющего вещества зависит от времени достижения фронтом загрязненных инфильтрационных вод водоносного горизонта. Время прохождения растворенным в воде радионуклидом толщи почв и пород зоны аэрации с заполнением их сорбционной емкости и последующим достижением грунтовых вод определялось по предложенному математическому выражению.

Выделение категорий по предложенному времени продвижения загрязняющего вещества через защитную зону по существу является приближенной прогнозной оценкой процесса загрязнения грунтовых вод в данном случае радионуклидами.

Карты защищенности грунтовых вод от загрязнения ^{90}Sr и ^{137}Cs строились на основе карты защитной зоны. Сравнение этих карт показывает, что наиболее опасен для грунтовых вод ^{90}Sr , т.к. загрязнение им может охватить в короткий период (меньше 5 лет) большие участки водоносного горизонта.

На карте защищенности грунтовых вод от загрязнения ^{90}Sr показано, что около 50% территории не защищены, 20% территории слабо защищены, еще 20% условно защищены (в основном) на севере и по 5% – защищены и средне защищены.

Иная ситуация складывается при загрязнении ^{137}Cs : незащищенные грунтовые воды приурочены только к узкой полосе вдоль русел рек, слабо защищенные – к долинам нескольких малых рек на северо-западе, средне защищенные – к высоким террасам рек, условно защищенные примыкают к водоразделам, условно защищенные и защищенные преобладают.

Таким образом, оценка времени продвижения радионуклидов через защитную зону позволяет дать приближенную прогнозную оценку процесса загрязнения грунтовых вод этим чрезвычайно опасным загрязняющим веществом.

Карта уязвимости грунтовых вод по ^{137}Cs строится на основе карты техногенной нагрузки по ^{137}Cs (распределение загрязнения поверхности земли ^{137}Cs) и карты защищенности грунтовых вод ^{137}Cs . Проведена оценка и картирование уязвимости грунтовых вод к радиоактивному загрязнению ^{137}Cs на момент аварии на ЧАЭС, спустя 30, 60 и 90 лет после аварии.

По данным поэтапной оценки уязвимости грунтовых к загрязнению, в целом, прослеживается тенденция изменения техногенной нагрузки на территории радиоактивного следа, что позволило сделать вывод, что в интервале 100-120 лет активность первоначальных поверхностных выпадений ^{137}Cs снизится до значений ниже предельных уровней, но будет еще превышать фоновые значения, а полностью исчезнет через 300 лет после аварии.

В течение 100-120 лет после аварии на ЧАЭС в зоне радиоактивного следа могут быть обнаружены участки, на которых загрязнение грунтовых вод ^{137}Cs будет превышать фоновые концентрации.

Ключевые слова: радиационная обстановка, мониторинг, радионуклиды, защищенность и уязвимость подземных вод, источники загрязнения, техногенная нагрузка.

DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10053

Подземные воды представляют собой стратегический ресурс водоснабжения населения, прежде всего в так называемые «особые периоды» – при возникновении природных катаклизмов, техногенных катастроф, терактов. В соответствии с Водным кодексом Российской Федерации (2006) каждый город должен иметь резервный источник водоснабжения, основанный на использовании экологически чистых, защищенных от загрязнения пресных подземных вод.

В связи с этим для обеспечения устойчивого водопользования страны и ее экологической безопасности целесообразно использовать методы оценки защищенности и уязвимости к загрязнению различными загрязняющими веществами.

26 апреля 2016 года исполнилось 30 лет после чрезвычайного и скорбного происшествия – аварии на Чернобыльской атомной электростанции. На территории России от этой аварии пострадали почти все центральные регионы ее европейской части, а наиболее сильно – Брянская, Тульская и Калужская области. Сейчас после аварии на ЧАЭС прошло уже более 30 лет, но проблемы с загрязнением окружающей среды радионуклидами будут сказываться еще долгое время. Известно, что активность радиоактивных выпадений исчезает полностью после 10 периодов полураспада. Наиболее сильно загрязнению подвержены первые от поверхности водоносные горизонты (грунтовые воды), в меньшей степени – напорные, глубоко залегающие подземные воды.

Актуальность данной темы заключена в том, что проблема загрязнения окружающей среды и подземных вод как ее компонента радионуклидами на территориях, пострадавших от аварии на ЧАЭС, будет экологически значимой почти три столетия.

В связи с этим важно изучить и оценить степень защищенности и уязвимости подземных вод к загрязнению радионуклидами в зоне радиоактивного следа на территории Калужской области.

Целью исследований было показать тенденцию уменьшения влияния радиоактивного загрязнения на грунтовые воды на территории Калужской области, пострадавшей от аварии, во времени с шагом один период полураспада ^{137}Cs до трех периодов полураспада.

Проведена оценка и картографирование защищенности грунтовых вод от радиоактивного загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr . Наиболее опасным для грунтовых вод является ^{90}Sr , который более интенсивно мигрирует в них с поверхности земли. Карты защищенности грунтовых вод от загрязнения радионуклидами позволяют давать предварительную прогнозную оценку

развития ситуации на многие годы вперед.

Проведена оценка и картографирование уязвимости грунтовых вод к радиоактивному загрязнению ^{137}Cs на момент аварии, спустя 30, 60 и 90 лет после нее.

Анализ радиационной обстановки на территории России и отдельных её регионах

Большинство из нас не осознают этого, но ядерные технологии являются частью повседневной жизни, применяясь в медицине, сельском хозяйстве и промышленности. Их используют в борьбе с такими болезнями, как малярия, и в управлении системами животноводства. Ядерные технологии также являются ключевым элементом в производстве медицинских изотопов и разработке терапевтических и диагностических процедур, которые ежедневно помогают спасти тысячи жизней (FORATOM ..., 2019). Однако энергия, запасенная в ядрах делящихся элементов, огромна и может привести к серьёзным последствиям для человечества и окружающей среды. Когда 6 и 8 августа 1945 года военно-воздушные силы США сбросили атомные бомбы на Хиросиму и Нагасаки, погибли и пострадали сотни тысяч мирных жителей. Следует помнить, что даже «мирный атом» ввиду сложной системы контроля и регулирования процесса деления может быть источником опасности. Истории известны катастрофы, связанные с авариями на атомных станциях и предприятиях атомного цикла. Первая крупная авария случилась в 1949 году в СССР на комбинате «Маяк» под Челябинском, где нарабатывали плутоний. Жидкие радиоактивные отходы попали в р. Течу. В сентябре 1957 года на этом же предприятии произошел взрыв с выбросом большого количества радиоактивного вещества. А через одиннадцать дней сгорел британский реактор по наработке плутония в Уиндскейле и облако с продуктами взрыва рассеялось над Западной Европой. В 1979 году сгорел реактор на атомной электростанции (АЭС) Тримейл-Айленд в Пенсильвании (Мотыляев, 2014).

Проблемы и перспективы атомной энергетики

События, последовавшие за аварией на атомной станции «Фукусима-1» в Японии в 2011 г., показали, что мониторинг окружающей среды на АЭС не потерял своей важности, а, скорее всего, стал еще более актуальным для функционирующих, строящихся и проектируемых станций по всему миру. В частности, эти события продемонстрировали, что уроки Чернобыля не были учтены другими странами, ведомствами и компаниями, занимающимися проблемами ядерной энергетики.

Авария на Чернобыльской атомной станции (ЧАЭС) в апреле 1986 г. произошла в основном в результате так называемого «человеческого фактора» и привела к катастрофическим последствиям для некоторых территорий европейской части России. Авария на станции «Фукусима-1» в Японии произошла в марте 2011 г., предположительно, в результате ошибки проектирования станции (она устояла при землетрясении, но не выдержала воздействия цунами). Выбросы в атмосферу, загрязнение почв и подземных вод как после аварии на ЧАЭС, так и после аварии на Фукусиме характеризуются практически аналогичными наборами радионуклидов, т.к. на обеих АЭС влиянию аварийной ситуации подверглось топливо. Как мы видим в настоящее время, подземные воды являются наиболее уязвимым объектом окружающей среды к загрязнению радионуклидами и на «Фукусиме» этот процесс оказался нерегулируемым.

По данным на конец 2019 года, в 31 стране работают 192 АЭС с общим числом энергоблоков равным 438 (Сколько атомных станций ..., 2006). Это меньше, чем в 2000 году, и на 6.9% ниже исторического максимума выработки электроэнергии на АЭС в 2006 году. Тем не менее, производство ядерной электроэнергии во всем мире после падения на

264 Твтч. (10%) после аварии в Фукусиме даже в Японии несколько увеличилось. На данный момент в мире статус строящегося имеют 55 блоков. Такие данные приводятся в базе PRIS (Power Reactor Information System, 2020), поддерживаемой Международным агентством по атомной энергии. Теперь в России база PRIS учитывает 36 действующих блоков (пятый показатель в мире) и 6 строящихся. Всего в 2018 году произведено 9 энергопусков новых блоков (семь в Китае и два в России), началось сооружение 5 блоков: в Турции, России и Бангладеш (во всех трёх странах – с водо-водяным энергетическим ядерным реактором (ВВЭР)), а также в Южной Корее и Британии (Левинзон, 2018).

«Перспективы развития атомной энергетики напрямую определяются её способностью конкурировать по цене электроэнергии с теплоэлектростанциями и возобновляемой энергетикой. В современных условиях, когда высока доступность природного газа, а стоимость солнечных и ветряных электростанций продолжает снижаться, перспективы развития атомной энергетики в мире выглядят умеренными. Её мощность будет увеличиваться (главным образом, за счёт Китая и других новых индустриальных стран), но доля в мировом энергобалансе будет оставаться стабильной или даже чуть снижаться» (Кудияров, 2018, <https://expert.ru/expert/2018/39/atomnyij-eksport>).

Теоретически можно ожидать роста атомной энергетики в случае существенного удешевления стоимости строительства АЭС или в случае радикального ужесточения политики по борьбе с выбросами парниковых газов.

«Атомная энергетика – чистый энергетический источник с хорошими характеристиками с точки зрения эффективности и стабильности, доступный для массового использования. Она играет жизненно важную роль в деле предотвращения изменения климата» (Корпорация CNNC, стр. 939), – заявил официальный представитель Китая Юй Цзяньфэн на 62-й сессии генеральной конференции Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). Европейская комиссия подтвердила, что ядерная энергия вместе с возобновляемыми источниками энергии станет основой европейской энергетической системы, свободной от углерода. Многолетние исследования в зарубежных странах показали, что соседство с АЭС приводит к росту заболеваний лейкемией. По этой причине в России было множество отказов от эффективных, но очень опасных проектов. Прогнозы дальнейшего использования атомной энергии противоречивы и неоднозначны. Большинство из них сходится к мнению, что к середине XXI века потребность в новых источниках энергии возрастет в связи с неизбежным увеличением численности населения (Левинзон, 2018). Прогнозируется, что глобальное расширение ядерной энергетики будет продолжаться в ближайшие десятилетия в основном потому, что многие правительства видят в ней лучший источник энергии в борьбе с изменением климата (FORATOM ..., 2019).

Мониторинг радиационной обстановки территории России и отдельных её регионов

Ежегодно федеральное государственное бюджетное учреждение, научно-производственное объединение (ФГБУ НПО) «Гайфун» публикует данные о радиационной обстановке, особое внимание уделяется территориям вокруг радиационно опасных объектов (РОО) и территориям, пострадавшим в ходе радиационных аварий и инцидентов (Радиационная обстановка ..., 2019). В ходе деятельности предприятий РОСАТОМ в окружающую среду в виде выбросов попадают более 50 различных радиоактивных изотопов, а в виде сбросов сточных вод – более 20, период полураспада которых варьирует от нескольких минут или часов ($T_{1/2}^{132}\text{I}=2.3$ ч) до нескольких миллионов или миллиардов лет ($T_{1/2}^{238}\text{U}=4.47 \cdot 10^9$ лет, $T_{1/2}^{239}\text{Pu}=2.41 \cdot 10^4$ лет). Основными дозообразующими техногенными радионуклидами являются ^{90}Sr и ^{137}Cs . Изотоп ^{90}Sr – это основной дозообразующий компонент поверхностных вод, его поступление в основном связано с его выносом с

загрязненных территорий (Радиационная обстановка ..., 2019).

Наиболее высокие значения объемной активности² ^{137}Cs постоянно фиксируются в зоне, загрязненной в результате аварии на ЧАЭС (Брянск, Курск). В разные годы они в 1.5-2 раза превышают средние уровни значений, характерных для центра Европейской территории России (ЕТР). В 2018 году средняя объемная активность ^{137}Cs в целом по РФ не изменилась по сравнению с 2017 годом и составила $1.6 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³. По регионам изменения минимальны, наиболее заметное уменьшение наблюдалось в Заполярье – от $1.2 \cdot 10^{-7}$ до $0.7 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, некоторое увеличение – на севере ЕТР – от $2.7 \cdot 10^{-7}$ до $3.7 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³. Такие изменения скорее следует рассматривать как стабилизацию радиационной обстановки на территории России (табл. 1).

За период с 1991 по 2011 год в воде российских рек объемная активность ^{90}Sr постепенно уменьшалась, достигнув в 2011 г. наименьшего значения в 4.0 мБк/л. В 2012-2017 годах стала заметна тенденция в сторону увеличения показателя, и в 2017 году он составил 5.5 мБк/л. В 2018 году зафиксировано самое низкое ее значение для ^{90}Sr – 3.7 мБк/л.

Средняя активность в реках ЕТР в 2018 году уменьшилась по сравнению с 2017 годом – 3.7 и 4.2 мБк/л соответственно. На Азиатской территории России изменения еще более заметны – от 6.7 мБк/л в 2017 году до 4.2 мБк/л в 2018 году. Значительное уменьшение зафиксировано в Енисее (Игарка) – от 13.4 до 3.7 мБк/л, Ангаре (Иркутск) – от 10.9 до 3.4 мБк/л, Оби (Салехард) – от 10.2 до 6.5 мБк/л (Радиационная обстановка ..., 2019).

На территории Центрального федерального округа (ЦФО) расположено 27 РОО: 19 – в Москве, 6 – в Московской области, 2 – в Калужской области. По одной АЭС расположено в Смоленской, Курской, Нововоронежской и Тверской областях. В Москве можно выделить два РОО, где эксплуатируются исследовательские ядерные реакторы: Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» и Московский инженерно-физический институт Национального исследовательского ядерного университета. На территории ЦФО можно выделить следующие РОО: Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна), Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод» (г. Электросталь), Акционерное общество «Государственный научный центр РФ, Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (г. Обнинск), Акционерное общество «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова» (г. Обнинск), а также Калининскую, Курскую, Смоленскую и Нововоронежскую АЭС.

Последствия аварии на ЧАЭС в 1986 г. привели к масштабному радиоактивному загрязнению многих субъектов ЦФО. На территориях Белгородской, Брянской, Воронежской, Калужской, Курской, Липецкой, Орловской, Рязанской и Тульской областей до сих пор есть населенные пункты, на территориях которых загрязнение ^{137}Cs превышает 1 Ки/км².

Радиационный мониторинг на территории округа проводится Центральным управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС), УГМС Центрально-Черноземных областей (ЦЧО) и ФГБУ НПО «Тайфун» Росгидромета.

В составе системы радиационного мониторинга на территории округа действуют (рис. 1): 147 пунктов наблюдения по измерению мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД, ежедневно); 46 пунктов по отбору проб радиоактивных атмосферных выпадений с помощью марлевых планшетов (экспозиция проб – одни сутки); 6 пунктов по отбору проб радиоактивных атмосферных аэрозолей с помощью воздухо-фильтрующей установки (на 3 пунктах экспозиция проб – одни сутки, на 3 – пять); 2 пункта по отбору проб осадков для анализа на содержание трития (п. Балчуг в г. Москве и станция фонового мониторинга в Серпуховском районе); 1 пункт (п. Брейтово, р. Волга) по отбору проб

² Объемная активность – это активность, приходящаяся на единицу объема источника.

поверхностных вод для анализа на тритий; 3 пункта (Бабьегородская плотина, Звенигород, Южный порт, р. Москва) по отбору проб поверхностных вод для анализа на содержание ^{90}Sr .

Таблица 1. Радиоактивность объектов окружающей среды на территории России в 2007-2018 гг.
Table 1. Radioactivity of environmental objects in Russia in 2007-2018.

Радионуклид, параметр	Единицы измерений	Среднегодовые данные по стране												Допустимые уровни
		2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	
Воздух													ДОА _{НАС.} *, Бк/м ³	
Объемная активность радионуклидов в приземной атмосфере														
$\Sigma\beta$	10 ⁻⁵ Бк/м ³	15.1	15.4	17.9	14.5	14.9	15.1	17.4	16	13.9	15.0	19.6	18.7	—****
^{137}Cs	10 ⁻⁷ Бк/м ³	2.8	2.3	2.4	2.4	54.8	2.5	2.6	2.6	2.4	1.8	1.6	1.6	27
^{90}Sr	10 ⁻⁷ Бк/м ³	0.9	0.97	0.95	0.73	0,83	0.89	0.88	0.63	0.85	1.19	1.23	1.07	2.7
$^{239+240}\text{Pu}$ (Обнинск)	10 ⁻⁹ Бк/м ³	5.4	5	9.9	11	6	3	24.9	7.1	27.0	8.2	9.45	3.5	2.5·10 ⁻³
Радиоактивные атмосферные выпадения														
$\Sigma\beta$	Бк/м ² в сутки	1.3	1.4	1.3	1.2	1.1	1.14	1.1	1.13	1.2	1.1	1.0	1.0	—
^{137}Cs	Бк/м ² в год	<0.4	<0.3	<0.3	<0.3	0.82	0.16	0.18	0.14	0.19	0.14	0.17	0.12	—
^3H	кБк/м ² в год	1.4	1.34	1.21	1.15	1.21	1.26	1.04	0.8	0.83	0.87	0.87	0.79	—
Объемная активность радионуклидов в атмосферных осадках														
^3H	Бк/л	2.4	2.6	2.5	2.2	2.5	2.3	1.9	1.7	1.6	1.7	1.75	1.65	—
Вода													УВ, Бк/л	
Объемная активность радионуклидов в речной воде														
$^{90}\text{Sr}^{***}$	мБк/л	5.1 (5.7)	4.5 (6.0)	4.3 (5.6)	4.2 (4.3)	4.1 (4.5)	4.8 (5.0)	4.3 (4.5)	4.9 (5.0)	4.8 (5.0)	4.6 (5.2)	5.5 (5.8)	3.7 (4.1)	4.9
^3H	Бк/л	1.9- 3.8	2.1- 3.3	1.6- 3.1	1.6- 2.9	1.6- 2.5	1.3- 3.4	1.2- 2.7	1.2- 2.4	1.9	1.7	1.7	1.7	7600
Объемная активность радионуклидов в морской воде														
^{90}Sr	мБк/л	1.0- 6.6	1.1- 6.1	1.4- 7.4	0.9- 5.0	1.2- 5.1	1.1- 5.4	1.0- 6.7	1.2- 8.9	1.1- 3.5	1.5- 6.1**	1.6- 3.9**	1.2- 4.8**	—

Примечания к таблице 1: *ДОА_{НАС.} – допустимая среднегодовая объемная активность радионуклидов в воздухе для населения по НРБ-96, НРБ-99, НРБ-99/2009; ** – без Таганрогского залива Азовского моря (в заливе в 2018 г. – 5.5 мБк/л); *** – дано осреднение

объемной активности ^{90}Sr в воде без учета проб, отобранных в 2005-2012 гг. в водах рек Кама, Вишера и Колва, в 2013-2015 гг. – без р. Нева, в 2016-2018 гг. – без рек Кама, Вишера и Колва; данные в скобках приведены с учетом всех проб; **** – допустимые уровни не установлены.

Анализ отобранных проб радиоактивных аэрозолей и выпадений на содержание суммарной бета-активности радионуклидов проводится в 8 радиометрических лабораториях и группах.

Из таблицы 2 видно, что выпадения ^{137}Cs остались примерно на уровне 2017 г. на всей территории ЦФО кроме Брянской и Тверской областей. Средневзвешенная по территории Центра ЕТР объемная активность ^{137}Cs в 2018 г. осталась примерно на уровне 2017 г. и составляла $3.4 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, что на 7 порядков ниже допустимой среднегодовой объемной активности по нормам радиационной безопасности (НРБ) 99/2009 (СанПиН ..., 2009). В пунктах, находящихся в 100-километровых зонах РОО, объемная активность ^{137}Cs была, как и в предшествующие годы, в 1.3-4 раза выше средневзвешенного значения по Центру ЕТР. Наибольшее значение, как и в 2017 г., наблюдалось в г. Курчатове.

Средневзвешенная объемная активность ^{90}Sr в 2018 г. в Центре ЕТР и всех пунктах наблюдения ЦФО (кроме Курчатова и Брянска) уменьшилась по сравнению с предыдущим годом. В пунктах, находящихся в 100-километровых зонах, его объемная активность была в 1.1-1.7 раза выше средневзвешенной активности в Центре ЕТР. Все наблюдаемые в течение года величины активности в воздухе на территории ЦФО были на 7 порядков ниже допустимой среднегодовой активности по НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009).

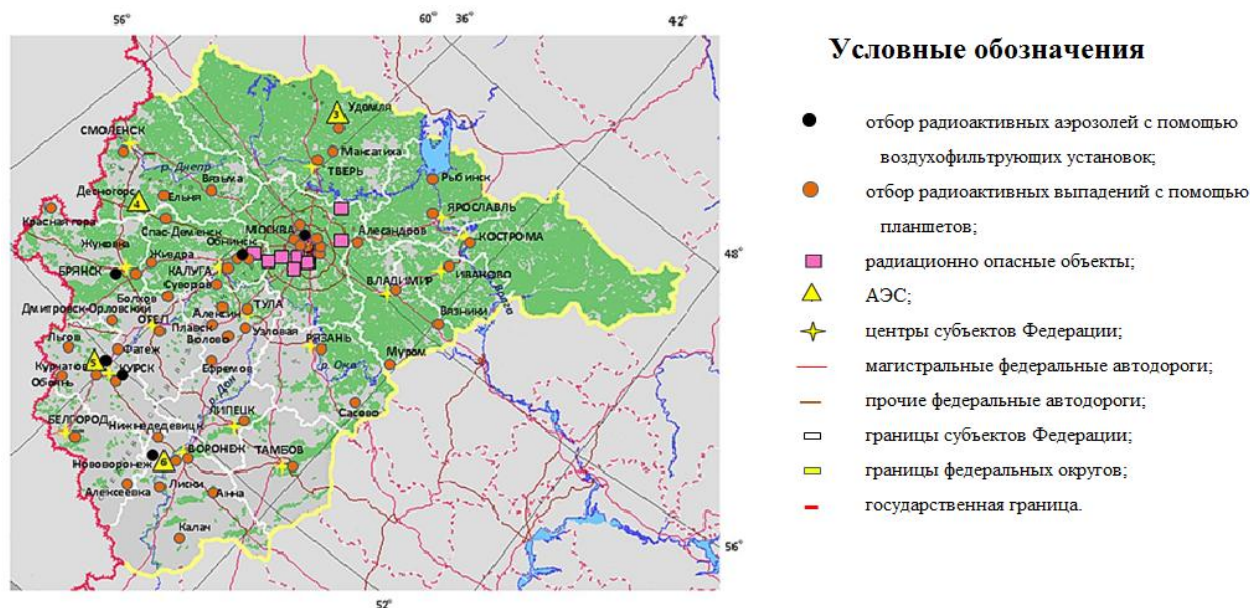


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдения за радиоактивным загрязнением приземного слоя атмосферы и радиационно опасных объектов на территории Центрального федерального округа. **Fig. 1.** Location of observation points for radioactive contamination of the surface layer of the atmosphere and radioactive substances in the territory of the Central Federal District.

Радиоактивные выпадения. Выпадения ^{90}Sr на подстилающую поверхность на территории ЦФО в 2018 г. были, как и в предыдущие годы, ниже предела обнаружения. Годовые выпадения ^{137}Cs в субъектах ЦФО в 2018 г. остались примерно на уровне 2017 г. на всей территории ЦФО кроме Брянской и Тверской областей. Средневзвешенные значения выпадений ^{137}Cs на незагрязненной территории Центра ЕТР также остались на уровне

предыдущего года. Через Тверскую область в апреле 2013 г. прошел след аэрозольного выброса ^{137}Cs , произошедшего на Машиностроительном заводе в г. Электросталь Московской области в результате радиационного инцидента. Высокие выпадения ^{137}Cs в Тверской области, начиная с 2013 г., по-видимому, являются следствием указанного события.

Таблица 2. Выпадения ^{137}Cs в г. Обнинске и других районах Калужской области.
Table 2. Deposition of ^{137}Cs in Obninsk and other areas of Kaluga Region.

Область	Выпадения ^{137}Cs	
	2018 г.	2017 г.
Белгородская	0.42	0.49
Брянская	0.53	1.02
Владимирская	0.20	0.16
Воронежская	0.38	0.50
Ивановская	0.20	0.16
Калужская	0.40	0.40
Костромская	0.20	0.16
Курская	0.54	0.47
Липецкая	0.42	0.49
Москва	0.17	0.23
Московская	0.20	0.16
Орловская	0.51	0.30
Рязанская	0.20	0.16
Смоленская	<0.2	0.19
Тамбовская	0.42	0.49
Тверская (Тверь/Максатиха)	0.3/1.4	0.9/3.3
Тульская	0.74	0.78
Ярославская	0.20	0.16
Средневзвешенное для Центра ЕТР (для незагрязненных территорий)	0.22	0.20

На загрязненных после Чернобыльской аварии территориях выпадения ^{137}Cs были значительно выше средневзвешенного значения для незагрязненных территорий Центра ЕТР.

Повышенные годовые выпадения ^{137}Cs наблюдаются и вблизи некоторых РОО. В Нововоронеже годовые выпадения в 2018 г. составляли меньше 1.3 Бк/м^2 , в Обнинске – 0.9 Бк/м^2 .

Выпадения ^{90}Sr в Обнинске в 2018 г. были ниже предела обнаружения. Выпадения природного радионуклида ^7Be в 2018 г. изменялись в диапазоне $11\text{-}74.0 \text{ Бк/м}^2$ в месяц, составив за год 479 Бк/м^2 . Выпадения природного ^{40}K составили 57.8 Бк/м^2 , изменяясь от значений меньше 1 до 7.4 Бк/м^2 в месяц.

Повышенное по сравнению с фоновыми уровнями содержание ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{238}Pu в приземном слое атмосферы г. Обнинска и регистрация ^{131}I обусловлены выбросами в атмосферу местных РОО.

Вода и другие объекты окружающей среды. Контроль загрязнения подземных вод на территории Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского, осуществляемый службой внешней дозиметрии института, в 2018 г. показал, что объемная $\Sigma\beta$ активность в воде наблюдательных скважин в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) изменялась от 0.1 до 990 Бк/л , в зоне наблюдения – от 0.1 до 37 Бк/л . Объемные $\Sigma\alpha$ и $\Sigma\beta$ активности радионуклидов в воде р. Протва составили меньше 0.05 и меньше 0.1 Бк/л соответственно и

не превышали контрольных уровней для питьевой воды – 0.2 Бк/л для $\Sigma\alpha$, 1.0 Бк/л для $\Sigma\beta$ в соответствии с НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009).

В подземных водах в окрестностях г. Обнинска в течение ряда лет наблюдается повышенное содержание трития. Его поступление в подземные воды связано с нарушением герметичности хранилищ твердых радиоактивных отходов Государственного научного центра Физико-энергетического института. В связи с этим из водозаборов и коммуникаций питьевого водоснабжения в разных районах г. Обнинска и других близлежащих населенных пунктов (гг. Малоярославец, Белоусово, Балабаново, д. Мишково) НПО «Тайфун» периодически отбирает пробы воды для анализа на тритий.

Анализ питьевой воды, отобранной на территории НПО «Тайфун» в г. Обнинске в 2018 г., показал, что содержание трития в течение года варьировало в пределах от 0.99 до 5.9 Бк/л при среднем значении 3.77 Бк/л, что примерно на 3 порядка ниже уровня вмешательства при поступлении радионуклидов с водой для населения по НРБ-99 и НРБ-99/2009 и в 2.2 раза выше среднего содержания трития в пресных водах рек ЕТР – 1.7 Бк/л.

Радиационный мониторинг в районах расположения атомных станций

Говоря о сравнительно небольшом количестве отходов от атомной энергетики по сравнению с иными областями энергетики, следует помнить о наличии в окружающей среде изотопов как природного, так и техногенного происхождения, которые в сумме составляют радиационный фон территорий. Каждая авария или инцидент на РОО привносит в окружающую среду ряд радионуклидов, опасность которых будет сохраняться достаточно длительное время.

У последствий аварии на ЧАЭС долгосрочная перспектива. Так, даже сейчас спустя 34 года после аварии на территории Российской Федерации загрязнение поверхности земли остается значительным в зоне радиоактивного следа и будет проявляться еще до 10 периодов полураспада радионуклидов (табл. 3; Яхрюшин, 2018).

Аварии на ЧАЭС и «Фукусиме-1» подтвердили уязвимость подземных вод. В связи с этим вопрос охраны подземных вод от радиоактивного загрязнения в районах расположения АЭС является актуальным, что также закреплено в руководстве по безопасности Международного агентства по атомной энергии.

До событий на ЧАЭС подземные воды не являлись объектом радиационного мониторинга, однако авария показала, что они чувствительны к радиоактивному загрязнению. В Белоруссии и на Украине на загрязненных территориях радионуклиды были обнаружены не только в грунтовых, но и в напорных глубокозалегающих подземных водах.

Таким образом, строительство и эксплуатация АЭС приводят к нарушению геологических, геохимических и экологических условий на прилегающих к станциям территориях. Проблемы охраны окружающей среды в районах расположения АЭС решаются с помощью функционирования системы комплексного экологического мониторинга, включающего взаимосвязанные подсистемы мониторинга гидросферы (МГС), атмосферы, литосферы и техносферы.

В своих исследованиях воспользуемся определением мониторинга, данным в Федеральном законе Российской Федерации «Об охране окружающей среды» (2002): «Мониторинг окружающей среды (экологический мониторинг) – комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов» (Федеральный ..., 2002, статья 1, http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/).

Один из авторов был разработчиком концепции комплексного экологического мониторинга атомных станций, выполненной в 1988-1989 гг. по заданию института

«Атомэнергопроект» (относящийся к Министерству атомной промышленности) после аварии на ЧАЭС (Белоусова и др., 1992). На основе системного подхода была разработана следующая структура МГС: вход в систему – исходная информация о текущем состоянии системы; система МГС, состоящая из трех подсистем – наблюдений (режима), оценок и прогноза; выход из системы – мероприятия по улучшению природно-технической обстановки (выход из системы МГС является входом в систему управления водными ресурсами; Белоусова, 2015, 2017).

Таблица 3. Распределение количества населенных пунктов (н/п) Российской Федерации по уровню загрязнением ^{137}Cs по состоянию на январь 2018 г. (Яхрюшин, 2018).

Table 3. Distribution of the number of settlements (н/п) of the Russian Federation by ^{137}Cs pollution level as of January 2018 (Яхрюшин, 2018).

№	Область (Республика)	Σ н/п	Σ проб	<1 Ки/км ²		1-5 Ки/км ²		5-15 Ки/км ²		15-40 Ки/км ²		>40 Ки/км ²	
				н/п	проб	н/п	проб	н/п	проб	н/п	проб	н/п	проб
1	Белгородская	543	4345	535	4272	8	73						
2	Брянская	1868	28373	1361	12742	312	7109	178	6806	15	1129	2	587
3	Волгоградская	5	25	4	20	1	5						
4	Воронежская	1144	9837	1130	975	10	83						
5	Калужская	562	6650	367	3249	190	3359	6	83				
6	Курская	1104	7005	1044	6341	60	664						
7	Ленинградская	156	2341	152	2274	4	67						
8	Липецкая	212	1753	203	1688	9	65						
9	Московская	9	50	9	50								
10	Нижегородская	138	779	138	779								
11	Новгородская	82	489	82	489								
12	Орловская	1537	13870	1178	10160	359	3710						
13	Пензенская	173	1446	166	1405	7	41						
14	Ростовская	2	10	2	10								
15	Рязанская	562	8511	466	7119	97	1392						
16	Саратовская	13	41	13	41								
17	Смоленская	79	476	79	476								
18	Тамбовская	111	996	109	996								
19	Тульская	2084	21727	1242	9881	822	11640	20	649				
20	Ульяновская	128	1021	128	1021								
21	Башкортостан	16	93	16	93								
22	Марий Эл	23	74	23	74								
23	Мордовия	331	1538	331	1538								
24	Чувашия	27	80	27	80								
ИТОГО		10909	112598	8805	74766	1879	28208	204	7538	15	1129	2	587
с учетом нежилых		11983	113202										

Рассмотрим данные радиационного мониторинга АЭС, расположенных в ЦФО (Радиационная обстановка ..., 2019).

Калининская АЭС (КАЭС) размещена в северо-западной части Тверской области в 150 км от г. Твери и на 3 км севернее г. Удомля. Зона промплощадки станции прилегает к южному берегу озера Удомля.

Структура КАЭС включает в себя четыре действующих энергоблока с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР-1000). Благодаря равнинной территории размещения станции в районе хорошо развита гидрографическая сеть. Имеется ряд крупных озер: Удомля, Песьво, Наволок, Кезадра и Кубыча. Озера Удомля и Песьво, объединенные естественной протокой, используются в качестве водоемов-охладителей АЭС. Регулирование стока и уровня вод в них осуществляется с помощью гидроузла на р. Съежа, вытекающей из оз. Удомля.

Газоаэрозольные радиоактивные выбросы в атмосферу на КАЭС осуществляются через четыре вентиляционных трубы высотой 100 м каждая. Система очистки отходящих газов и аэрозолей снижает активности выбросов, йода и инертных радиоактивных газов (ИРГ) до 99.9% (Радиационная обстановка ..., 2019).

По данным ежегодника о радиационной обстановке в России (Радиационная обстановка ..., 2019), в 2018 г. наблюдалось повышение годового выброса изотопа йода ^{131}I и ИРГ, однако зарегистрированные значения не вышли за пределы установленных нормативов и составили 3.1 и 7.7% от допустимых выбросов соответственно. Годовые выбросы изотопов кобальта и цезия (^{60}Co , ^{134}Cs и ^{137}Cs) в 2018 г. оказались ниже, чем в 2017 г., и составляли меньше 0.1% для ^{60}Co и ^{134}Cs и 0.4% для ^{137}Cs от допустимых показателей. Анализ выбросов показал, что наибольший вклад в их активность вносят ИРГ.

В 2007 г. был введен в эксплуатацию полигон глубинного захоронения, расположенный на глубине 1400 м, именно туда на захоронение закачиваются в подземные глубинные горизонты промливневые стоки после химводоочистки на КАЭС. Полигон представляет собой подземный горизонт песков, насыщенных рассолами с солесодержанием 220 г/л, изолированный от иных водоносных горизонтов водоупорными пластами толщиной до 600 м (1400 метров под землей ..., 2018). Жидкие низкоактивные отходы сбрасываются в естественные водоемы-охладители: озера Песьво и Удомля. Объем технологических стоков, поступивших в 2018 г. в озера, которые включают в себя дебалансные воды из контрольных баков, регенерационные и отмывочные воды, составил 2029 м³. Стоки из брызгальных бассейнов составили 44100 м³. В таблице 4 приведена информация о сбросах радионуклидов в открытую гидрографическую сеть в 2018 г. на КАЭС.

Сравнивая показатели абсолютного значения суммарной активности сброса, в 2018 г. (0.011 ТБк) наблюдается снижение в 3.4 раза по сравнению с 2017 г., что можно связать с вкладом трития в активность сброса (97.3%), поскольку в 2018 г. его сброс уменьшился в 3.6 раза, а в итоге составил 0.05% от допустимого. Также в 2018 году зафиксировано снижение сбросов всех иных контролируемых радионуклидов (фактические сбросы были на 2-5 порядков ниже допустимых) и случаев превышения контрольного уровня допустимых сбросов.

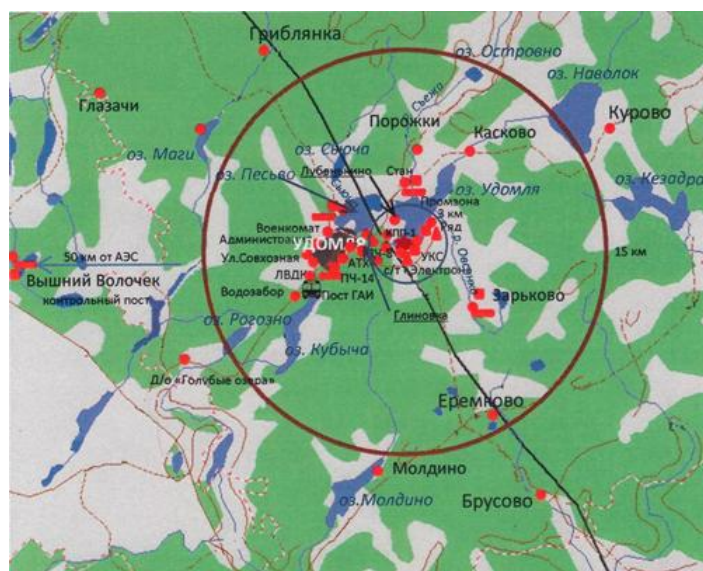
На рисунке 2 показано, каким образом в 2018 г. Лаборатория внешнего дозиметрического контроля (ЛВДК) организовала мониторинг радиационного загрязнения объектов окружающей среды в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения КАЭС, а на рисунке 3 показана схема расположения пунктов радиационного мониторинга Северо-Западного и Центрального УГМС (Радиационная обстановка ..., 2019).

Оценка и контроль радиационной обстановки в радиусе до 100 км вокруг КАЭС производится Северо-Западным и Центральным УГМС, а в радиусе до 25 км – ЛВДК КАЭС. В 7 пунктах постоянного наблюдения измерялась объемная активность радионуклидов в приземном слое атмосферы (один пункт – в СЗЗ, шесть – в зоне наблюдения и в контрольном пункте г. Вышний Волочек, в 50 км на юго-запад от АЭС). В трёх из семи пунктов так же определялась радиоактивность атмосферных выпадений: в СЗЗ – пост № 1 (промзона), в зоне наблюдения – пост № 2 (д. Глиновка) и пост № 3 (д. Ряд). В 5 точках мониторинга зоны наблюдения по пробам снега проводилась оценка плотности радиоактивных выпадений из атмосферного воздуха. Пробоотбор происходил перед началом весеннего снеготаяния вблизи стационарных постов зоны наблюдения. Полученные пробы (кюветы) подвергали

упариванию и озолению для концентрирования радионуклидов, затем полученный материал использовали для определения содержания радионуклидов в почве, растительности, питьевой воде, воде из открытых водоемов, а также в донных отложениях, рыбе и пищевой продукции местного производства. Также данные проб используются для анализа и мониторинга МАЭД и годовой поглощенной дозы на местности.

Таблица 4. Сбросы радионуклидов в озера Песьво и Удомля со сточными водами на КАЭС, Бк/год. **Table 4.** Discharges of radionuclides into Pesvo and Udomlya lakes with sewage at the Kalinin Nuclear Power Plant, Bq/year.

Радионуклиды	Допустимый сброс	Фактический сброс		Увеличение (+), снижение (-) сбросов в 2018 г. по сравнению с 2017 г.
		2018 г.	2017 г.	
^3H	$2.00 \cdot 10^{13}$	$9.10 \cdot 10^9$	$3.31 \cdot 10^{10}$	$-2.40 \cdot 10^{10}$
^{51}Cr	$4.87 \cdot 10^{13}$	$6.13 \cdot 10^7$	$1.40 \cdot 10^8$	$-7.87 \cdot 10^7$
^{54}Mn	$2.13 \cdot 10^{10}$	$7.50 \cdot 10^6$	$1.71 \cdot 10^7$	$-9.60 \cdot 10^6$
^{58}Co	$3.60 \cdot 10^{11}$	$6.84 \cdot 10^6$	$1.56 \cdot 10^7$	$-8.76 \cdot 10^6$
^{60}Co	$6.13 \cdot 10^{11}$	$7.50 \cdot 10^6$	$1.72 \cdot 10^7$	$-9.70 \cdot 10^6$
^{59}Fe	$5.92 \cdot 10^{11}$	$1.37 \cdot 10^7$	$3.12 \cdot 10^7$	$-1.75 \cdot 10^7$
^{65}Zn	$5.39 \cdot 10^9$	$1.61 \cdot 10^7$	$3.68 \cdot 10^7$	$-2.07 \cdot 10^7$
^{89}Sr	$2.29 \cdot 10^{11}$	$1.76 \cdot 10^6$	$4.03 \cdot 10^6$	$-2.27 \cdot 10^6$
^{90}Sr	$4.38 \cdot 10^9$	$1.76 \cdot 10^6$	$4.03 \cdot 10^6$	$-2.27 \cdot 10^6$
^{95}Zr	$1.18 \cdot 10^{13}$	$1.32 \cdot 10^7$	$3.02 \cdot 10^7$	$-1.70 \cdot 10^7$
^{106}Ru	$2.45 \cdot 10^{10}$	$6.42 \cdot 10^7$	$1.47 \cdot 10^8$	$-8.28 \cdot 10^7$
^{13}I	$6.51 \cdot 10^{10}$	$7.50 \cdot 10^6$	$1.72 \cdot 10^7$	$-9.70 \cdot 10^6$
^{134}Cs	$2.96 \cdot 10^9$	$8.16 \cdot 10^6$	$3.72 \cdot 10^7$	$-2.90 \cdot 10^7$
^{137}Cs	$3.39 \cdot 10^9$	$8.16 \cdot 10^6$	$6.52 \cdot 10^7$	$-5.70 \cdot 10^7$
^{144}Ce	$4.58 \cdot 10^{11}$	$5.51 \cdot 10^7$	$1.26 \cdot 10^8$	$-7.09 \cdot 10^7$



Условные обозначения

- ★ АЭС;
- наблюдения за γ -фоном;
- ▲ отбор проб атмосферных выпадений;
- отбор проб атмосферных аэрозолей;
- ▣ отбор проб снега;
- ⊞ передвижная радиометрическая лаборатория ЛВДК КАЭС.

Рис. 2. Расположение пунктов радиационного мониторинга в 25-км зоне вокруг КАЭС.

Fig. 2. Location of radiation monitoring points in the 25-km zone around the Kalinin Nuclear Power Plant.

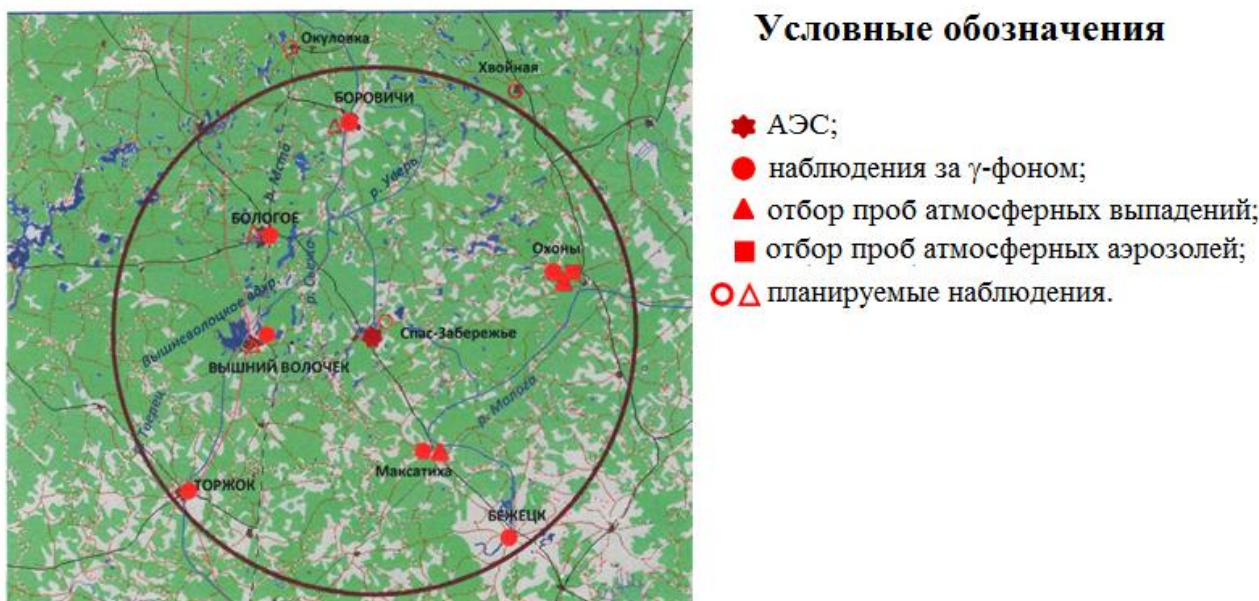


Рис. 3. Расположение пунктов радиационного мониторинга в 100-км зоне вокруг КАЭС. **Fig. 3.** Location of radiation monitoring points in the 100-km zone around the Kalinin Nuclear Power Plant.

В 2018 г. в 100-км зоне КАЭС радиационный мониторинг включал в себя определение радиоактивности атмосферных аэрозолей в одном пункте путем отбора проб на фильтры с помощью воздухо-фильтрующей установки с экспозицией в 5 дней, в двух пунктах – с помощью марлевых планшетов с суточной экспозицией и определение МАЭД в 7 пунктах постоянного наблюдения.

Приземная атмосфера. Анализ данных ЛВДК КАЭС показывает, что в 2018 г. в СЗЗ и зоне наблюдения характер техногенной активности приземной атмосферы, как и в предыдущие годы, в основном обусловлен наличием ^{137}Cs , а содержание иных техногенных радионуклидов в атмосферных аэрозолях было ниже предела обнаружения.

Среднегодовая активность изотопа ^{137}Cs в 2018 г. в СЗЗ осталась на уровне 2017 г., а в зоне наблюдения снизилась в 1.3 раза.

В таблице 5 отображены значения для двух населенных пунктов в сравнении с усредненными показателями по северной части ЕТР, где видно, что в 2018 г. среднемесячная объемная $\Sigma\beta$ активность в пос. Охоны (находится в пределах 100-км зоны) изменялась от $2.8 \cdot 10^{-5}$ до $9.1 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, а среднегодовая была в 1.8 раза ниже средневзвешенного значения для Севера ЕТР – $9.7 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³. Годовые значения $\Sigma\beta$ активности выпадений в 2018 г. в пос. Охоны и Максатиха остались на уровне 2017 г. Среднемесячные величины $\Sigma\beta$ активностей суточных атмосферных выпадений варьировали в пунктах наблюдения в пределах от 0.3 до 1.0 Бк/м² в сутки. Максимальные суточные значения в пос. Максатиха наблюдались в июне и составляли 7.5 Бк/м² в сутки, в Охона – в октябре и составляли 2.5 Бк/м² в сутки (Радиационная обстановка ..., 2019).

В 2018 г., по данным ЛВДК КАЭС, в пределах 25-км зоны среднегодовая объемная $\Sigma\beta$ активность в воздухе СЗЗ КАЭС составляла $12.7 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, в зоне наблюдения – $10.2 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³.

Вода и другие объекты окружающей среды. Радиационный контроль водоемов, расположенных в СЗЗ и зоне наблюдения АЭС, проводился ЛВДК один раз в полугодие. Усредненные результаты исследований представлены в таблице 6, где отдельно выделены водоемы-охладители (озера Песьво и Удомля), река Съежа (вытекающая из водоемов-

охладителей), а также близлежащие водоемы, не связанные со сбросами атомной станции – озера Саминец и Кубыча, расположенные в зоне наблюдения и выбранные в качестве фоновых.

Таблица 5. Среднемесячные (с) и максимальные суточные (м) значения $\Sigma\beta$ выпадений (Р, Бк/м²·сутки) и объемной $\Sigma\beta$ в воздухе (q, 10⁻⁵ Бк/м³) в 100-км зоне КАЭС в 2018 г. (данные Северо-Западного и Центрального УГМС; Радиационная обстановка ..., 2019, с. 188). **Table 5.** Monthly average (s) and maximum daily (m) values $\Sigma\beta$ of deposition (P, Bq/m²·day) and volumetric $\Sigma\beta$ in air (q, 10⁻⁵ Bq/m³) in the 100-km zone of the Kalinin Nuclear Power Plant in 2018 (data of the Northwest and Central Territorial Administration for Hydrometeorological and Environmental Monitoring; Радиационная обстановка ..., 2019, p. 188).

Месяц		Охоны		Максатиха	Север	ЕТР
		Р	q	Р	Р	q
Январь	с	0.5	5.0	0.9	1.37	12.62
	м	1.6	10.8	2.0		
Февраль	с	0.3	3.5	0.6	0.81	17.55
	м	0.9	6.7	1.0		
Март	с	0.4	2.8	0.7	0.57	7.07
	м	2.0	3.5	2.2		
Апрель	с	0.4	3.7	0.8	0.48	9.65
	м	2.3	5.7	3.7		
Май	с	0.4	5.8	0.9	0.45	11.33
	м	0.9	11.1	2.6		
Июнь	с	0.8	5.8	1.0	0.41	9.73
	м	2.0	8.7	7.5		
Июль	с	0.5	7.1	0.9	0.52	13.14
	м	1.1	12.6	5.2		
Август	с	0.6	8.4	0.9	0.42	8.86
	м	1.6	15.0	4.2		
Сентябрь	с	0.4	9.1	0.7	0.55	6.78
	м	1.1	24.2	2.1		
Октябрь	с	0.6	4.6	0.6	0.64	4.47
	м	2.5	6.6	1.2		
Ноябрь	с	0.6	4.2	0.9	0.67	6.04
	м	1.8	6.3	2.1		
Декабрь	с	0.4	5.3	0.8	1.03	9.18
	м	1.6	15.3	2.8		
Среднее	2018 г.	0.5	5.5	0.8	0.66	9.70
	2017 г.	0.5	5.2	0.8	0.73	8.65
Сумма, Бк/м ² ·год	2018 г.	183		292	241	
	2017 г.	183		292	266	

Из таблицы 6 также видно, что в пробах воды из разных водоемов, объемные активности радионуклида ¹³⁷Cs находятся на уровне предела обнаружения используемого метода анализа. Средняя объемная активность трития в водоемах-охладителях в 2018 г. оказалась на два порядка ниже установленного в НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009) уровня вмешательства и

рекомендованного контрольного уровня (5000 Бк/л по данному нуклиду для водоемов-охладителей).

Таблица 6. Содержание радионуклидов в объектах окружающей среды в районе расположения КАЭС (данные ЛВДК КАЭС; Радиационная обстановка ..., 2019, с. 189).

Table 6. The content of radionuclides in environmental objects around the Kalinin Nuclear Power Plant (data from the power plant distillery; Радиационная обстановка ..., 2019, p. 189).

Пункт контроля	¹³⁷ Cs		⁶⁰ Co		³ H, Бк/л		⁹⁰ Sr		
	Годы	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017
Вода открытых водоемов, мБк/л									
оз. Песьво (устье сбросного канала)	<1.7	<2.0	–*	–	11	11	5.2	5.7	
оз. Удомля (входной канал)	<1.4	<1.4	–	–	11	12	3.6	5.0	
р. Съежа (вытекает из оз. Удомля)	<1.8	<1.8	–	–	<10	<10	5.1	6.1	
оз. Саминец (ЗН) – контрольный водоем	<1.8	<1.8	–	–	<10	<10	2.3	4.3	
оз. Кубыча (ЗН) – контрольный водоем	<1.8	<1.6	–	–	<10	<10	1.6	2.6	
Питьевая вода, мБк/л									
Водозабор г. Удомля	<1.6	<1.7	–	–	<10	<10	<1.7	<1.7	
д. Ряд (3 км от АЭС)	<1.4	<2.0	–	–	<10	<10	<1.7	<1.8	
д. Митрошино (4.7 км от АЭС)	<1.4	<2.0	–	–	<10	<10	<1.7	<1.8	
Водозабор г. Вышний Волочек (50 км от АЭС) – контрольный источник	<1.7	<1.9	–	–	<10	<10	<1.7	<1.6	
Донные отложения водоемов, Бк/кг с.-м.									
оз. Песьво (устье сбросного канала)	<0.46	<0.69	<0.39	<0.56	–	–	<1.72	<1.42	
оз. Удомля (входной канал)	<0.47	<0.71	<0.38	<0.55	–	–	<1.56	<1.21	
р. Хомутовка, устье (СЗЗ)	<0.49	<0.77	<0.38	<0.60	–	–	–	–	
р. Съежа (вытекает из оз. Удомля)	<0.53	9.48	<0.45	<0.71	–	–	–	–	
оз. Саминец (ЗН) – контрольный водоем	<0.58	3.95	<0.52	<0.63	–	–	–	–	
оз. Кубыча (ЗН) – контрольный водоем	<0.45	3.20	<0.37	<0.53	–	–	–	–	
Почва, кБк/м²									
СЗЗ	0.24	0.12	<0.050	<0.054	<0.055	<0.059	–	–	
ЗН	0.12	0.30	<0.039	<0.056	<0.043	<0.064	–	–	
г. Вышний Волочек (50 км от АЭС) – контрольный пункт	0.45	0.26	<0.059	<0.046	<0.065	<0.050	–	–	

Примечания к таблице 6: * – измерения не проводились.

В связи с наличием полигона глубинного захоронения в 2018 г. значение среднегодовой объемной активности трития в водоемах-охладителях ниже, чем среднее за предыдущие 5 лет. В контрольных водоемах (оз. Саминец и Кубыча), в р. Съежа и питьевой воде в 2018 году нуклид не был обнаружен (активность меньше порога обнаружения в 10 Бк/л).

Основным источником питьевой воды для новой части г. Удомля и промплощадки КАЭС

служит водозабор города. В 2018 г. объемная $\Sigma\beta$ и $\Sigma\alpha$ активности питьевой воды не превышали контрольных уровней. Из представленных в таблице 6 данных по содержанию ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^3H в воде водозабора, артезианских скважин близлежащих деревень и водозабора контрольного пункта – г. Вышнего Волочка видно, что объемные активности во всех пробах питьевой воды были ниже предела обнаружения (Радиационная обстановка ..., 2019).

В таблице 6 приведены данные о содержании радионуклидов в донных отложениях открытых водоемов, однако следует понимать, что удельные активности радионуклидов являются наиболее низкими по каждому из приведенных водоемов, поскольку отбор проб проводился вдоль береговой линии. Грунты в этих зонах представляют собой заиленный песок, содержание радионуклидов в котором ниже, чем в грунтах, представленных в виде илов и сапропелей, расположенных в этих же водоемах на больших глубинах. В 2002-2003 гг. в ходе исследований проводился пробоотбор на мелководных и глубоководных участках водоемов-охладителей. Их анализ показал, что из техногенных радионуклидов в донных отложениях был обнаружен только ^{137}Cs – в основном в илах (5.5-96.2 Бк/кг воздушно-сухой массы) и сапропелях (12.6-70.3 Бк/кг воздушно-сухой массы). Значения контролируемых величин находятся на уровне средних показателей за 5 предыдущих лет наблюдений (ниже порога обнаружения) и гораздо меньше соответствующих значений «нулевого фона», что говорит об отсутствии накопления нуклидов в донных отложениях (Радиационная обстановка ..., 2019).

В районе КАЭС один раз в год отбираются пробы почвы с глубины 5 см. Точки отбора находятся вблизи постов постоянного наблюдения: в СЗЗ – 1 точка контроля, в зоне наблюдения – 6, в контрольном пункте (г. Вышний Волочек) – 1. Радиоактивность почвы обуславливается наличием изотопа ^{137}Cs глобального происхождения, он достоверно определялся в пробах почвы, отобранных в СЗЗ, зоне наблюдения и контрольном пункте.

Обобщенные данные о содержании радионуклидов в продуктах питания в зоне наблюдения КАЭС представлены в таблице 7. Содержание таких радионуклидов, как ^{137}Cs и ^{90}Sr , в продуктах во все годы контроля такое же, как и до введения в эксплуатацию КАЭС. В 2018 г. наибольшие значения по содержанию радионуклидов показала луговая растительность (^{90}Sr – 1.7 Бк/кг сырой массы), грибы (^{137}Cs – 7.9 Бк/кг сырой массы), что на один-два порядка ниже допустимых удельных активностей. Содержание ^{131}I в молоке не выявлено (<0.04 Бк/кг; Радиационная обстановка ..., 2019).

«По данным ежедневных (каждые три часа) наблюдений Северо-Западного и Центрального УГМС, в 2018 г. среднемесячные значения МАЭД в 100-км зоне вокруг КАЭС колебались в пределах от 0.09 до 0.15 мкЗв/ч, максимальные измеренные значения достигали 0.21 мкЗв/ч, что находится в пределах колебаний естественного γ -фона. Среднегодовые значения МАЭД составляли 0.09-0.14 мкЗв/ч.

Контроль годовой дозы на местности проводился термолюминесцентным методом. Полученные данные показывают, что при нормальной эксплуатации АЭС и при достигнутых значениях выбросов радионуклидов с АЭС значимое отличие дозы на местности в районе КАЭС от дозы в контрольном пункте отсутствует.

Таким образом, влияние КАЭС на радиоактивность объектов окружающей среды в 2018 г. было невелико. Оно выражается в повышенном содержании трития в озерах Песьво и Удомля. Однако объемная активность трития в воде озер на два порядка ниже уровня вмешательства по НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009) и не представляет опасности для здоровья населения» (Радиационная обстановка ..., 2019, стр. 206).

Курская атомная станция (КуАЭС) расположена в 3 км от г. Курчатова и примерно в 40 км от г. Курска на левом берегу р. Сейм в его среднем течении. Сейм впадает в р. Десну, которая впадает в р. Днепр.

На данный момент КуАЭС состоит из четырех активных энергоблоков (№ 1 и №2 – первая очередь, № 3 и №4 – вторая очередь) с реакторами РБМК-1000, энергоблок № 5 третьей

очереди находится в стадии консервации и из-за экономической необоснованности достраиваться не будет. Проектная мощность каждого блока – 1000 МВт (электрическая) и 3200 МВт (тепловая).

Таблица 7. Содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции в районе расположения КАЭС, Бк/кг с.-м. (данные ЛВДК КАЭС; Радиационная обстановка ..., 2019, с. 191). **Table 7.** The content of radionuclides in agricultural products in the area of the Kalinin Nuclear Power Plant, Bq/kg of dry weight (data from the power plant distillery; Радиационная обстановка ..., 2019, p. 191).

Вид пробы	¹³⁷ Cs			⁹⁰ Sr		
	2018 г.	До пуска АЭС*		2018 г.	До пуска АЭС	
Растительность луговая	<0.34		1.6	1.7		15.9
Корнеплоды	<0.06		0.09	0.17		0.08
Овощи	<0.04		0.1	0.10		0.16
Допустимая уд. акт.		120			40	
Ягоды	3.6		–**	0.14		–
Допустимая уд. акт.		160			60	
Грибы	7.9		–	0.11		–
Допустимая уд. акт.		500			50	
Молоко	<0.02		0.27	0.06		0.17
Допустимая уд. акт.		100			25	
Мясо	<0.05		0.12	<0.07		0.11
Допустимая уд. акт.		160			50	
Рыба	<0.46		0.50	0.39		1.5
Допустимая уд. акт.		130			100	

Примечания к таблице 7: * – в Бк/кг сухой массы, ** – нет данных.

По данным НПО «Тайфун», в марте 2005 г. установлены следующие границы СЗЗ и зоне наблюдения КуАЭС: радиус СЗЗ составляет 1.7 км, зоны наблюдения – 19 км. В зоне наблюдения проживает 69.3 тыс. человек (Радиационная обстановка ..., 2019).

«Радиоактивные выбросы в атмосферу на КуАЭС осуществляются через две вентиляционные трубы высотой 150 м, трубы машинного зала высотой 50 м, вентрубу хранилища отработанного ядерного топлива (ХОЯТ) – 26 м, вентрубу здания – 40 м, вентрубу хранилища твердых радиоактивных отходов – 30 м. Перед выбросом в атмосферу воздух проходит очистку на аэрозольных фильтрах. Для уменьшения активности выбросов в окружающую среду используются камера выдержки (первая очередь) и установка подавления активности (вторая очередь). Данные о выбросах регламентируемых радионуклидов на КуАЭС в атмосферу в 2018 г. представлены в таблице 8. Из приведенных данных видно, что в 2018 г. годовые выбросы ¹³¹I, ¹³⁴Cs и суммы ИРГ незначительно увеличились по сравнению с 2017 г., выбросы ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs уменьшились в 1.7 и 1.1 раза соответственно и составляли от 1.0% для ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs до 13.1% для суммы ИРГ от допустимых нормативов» (Радиационная обстановка ..., 2019, стр. 201).

Дебалансные воды (избыточные воды, прошедшие специальную обработку) поступают в систему проливневой канализации, а она в свою очередь поступает в р. Сейм. В 2018 г. объем сброса промышленно-ливневых и дебалансных вод на КуАЭС составил $5.3 \cdot 10^4$ м³.

Таблица 8. Выбросы радионуклидов в атмосферу на КуАЭС, Бк (Радиационная обстановка ..., 2019, с. 201). **Table 8.** Emissions of radionuclides into the atmosphere at the Kursk Nuclear Power Plant, Bq (Радиационная обстановка ..., 2019, p. 201).

Наименование радионуклида	Допустимый выброс	Фактический выброс		Увеличение (+), снижение (-) выбросов в 2018 г. по сравнению с 2017 г.
		2018 г.	2017 г.	
⁶⁰ Со	$2.5 \cdot 10^9$	$1.08 \cdot 10^8$	$1.85 \cdot 10^8$	$-7.7 \cdot 10^7$
¹³ И	$9.3 \cdot 10^{10}$	$1.11 \cdot 10^9$	$1.03 \cdot 10^9$	$+8.0 \cdot 10^7$
¹³⁴ Cs	$1.4 \cdot 10^9$	$1.33 \cdot 10^7$	$1.30 \cdot 10^7$	$+3.0 \cdot 10^5$
¹³⁷ Cs	$4.0 \cdot 10^9$	$3.80 \cdot 10^7$	$4.30 \cdot 10^7$	$-5.0 \cdot 10^6$
Сумма ИРГ	$3.7 \cdot 10^{15}$	$4.85 \cdot 10^{14}$	$4.80 \cdot 10^{14}$	$+5.0 \cdot 10^{12}$

Водоем-охладитель расположен на ровной, местами заболоченной, левобережной пойме р. Сейм между хутором Александровский и деревней Глушково. Водоем-охладитель разделен на два рукава струераспределительной дамбой, предназначенной для равномерного распределения потока нагретой воды по всей акватории.

Данные о содержании радионуклидов в сбросах КуАЭС в реку Сейм, а также нормативы по допустимым сбросам для отдельных радионуклидов представлены в таблице 9. В 2018 г. в сбросах КуАЭС регистрировался ³Н, концентрация которого возросла в 3.8 раза по сравнению с показателем 2017 г., он играет основную роль в активности сбросов, однако его годовой сброс не превышал 0.13% от допустимого.

Радиационная обстановка вокруг КуАЭС в радиусе до 100 км контролируется УГМС ЦЧО, а в радиусе до 30 км – лабораторией внешнего радиационного контроля (ЛВРК) КуАЭС.

В 2018 г. контроль радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды в СЗЗ и зоне наблюдения КуАЭС посредством ЛВРК включал в себя комплекс мероприятий по определению объемной активности радионуклидов в приземном слое атмосферы путем анализа в объединенных за месяц пробах атмосферных аэрозолей в 7 пунктах различной удаленности и географической направленности от АЭС, определению радиоактивности атмосферных выпадений в 8 пунктах из анализа месячных проб. Кроме того, проводились исследования содержания радионуклидов в питьевой воде, воде из открытых водоемов, промстоков КуАЭС и скважин промплощадки, радиоизотопного состава почвы, донных отложений, в рыбе водоема-охладителя и рек, а также в растительной продукции местного производства. Проводился контроль уровня МАЭД и суммарной дозы облучения на местности в СЗЗ и зоне наблюдения (Радиационная обстановка ..., 2019).

Наблюдения за радиационной обстановкой в 100-км зоне вокруг КуАЭС независимо от ЛВРК АЭС осуществляет УГМС ЦЧО (рис. 4, 5).

По данным ФГБУ НПО «Тайфун» (Радиационная обстановка ..., 2019), «в 2018 г. в 100-км зоне вокруг КуАЭС проводился радиационный мониторинг следующих параметров окружающей среды (рис. 4, 5):

- объемной активности радионуклидов в приземном слое атмосферы путем непрерывного отбора проб с помощью воздухо-фильтрующей установки на фильтроткань ФПП-15-1.5 на двух станциях: в г. Курске – ежедневно (установка «19ЦС-48») и в г. Курчатове – с экспозицией пять суток (6 проб в месяц) с помощью модернизированной установки «Тайфун-3а»;

- радиоактивных атмосферных выпадений на 6 станциях с помощью горизонтальных марлевых планшетов без бортиков площадью 0.3 м^2 с суточной экспозицией;

- объемной активности радионуклидов в воде открытых водоемов (в пруде-охладителе, прр. Реут и Сейм) при ежемесячных маршрутных обследованиях 20-км зоны КуАЭС;

Таблица 9. Сбросы радионуклидов в открытую гидрографическую сеть на КуАЭС, Бк (Радиационная обстановка ..., 2019, с. 202). **Table 9.** Discharges of radionuclides into an open hydrographic network at the Kursk Nuclear Power Plant, Bq (Радиационная обстановка ..., 2019, p. 202).

Радионуклид	Сброс за 2018 г., Бк	Индекс сброса в 2018 г.	Сброс за 2017 г., Бк	Индекс сброса в 2017 г.
^3H	$1.11 \cdot 10^{11}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$	$2.906 \cdot 10^{10}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$
^{51}CrI	* $1.33 \cdot 10^7$	$1.21 \cdot 10^{-5}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^{-6}$
^{54}Mn	* $1.33 \cdot 10^7$	$2.56 \cdot 10^{-2}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$6.8 \cdot 10^{-3}$
^{59}Fe	* $1.33 \cdot 10^7$	$6.33 \cdot 10^{-4}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$1.7 \cdot 10^{-4}$
^{58}Co	* $1.33 \cdot 10^7$	$3.91 \cdot 10^{-3}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$1.0 \cdot 10^{-3}$
^{60}Co	* $1.33 \cdot 10^7$	$1.77 \cdot 10^{-2}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$4.7 \cdot 10^{-3}$
^{65}Zn	* $1.33 \cdot 10^7$	$1.02 \cdot 10^{-1}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$2.7 \cdot 10^{-2}$
^{89}Sr	* $5.34 \cdot 10^6$	$2.97 \cdot 10^{-3}$	* $1.41 \cdot 10^6$	$7.8 \cdot 10^{-4}$
^{90}Sr	* $5.34 \cdot 10^6$	$4.11 \cdot 10^{-2}$	$1.79 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
^{95}Zr	* $1.33 \cdot 10^7$	$6.33 \cdot 10^{-4}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$1.7 \cdot 10^{-4}$
^{103}Ru	* $1.33 \cdot 10^7$	$3.33 \cdot 10^{-4}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$8.8 \cdot 10^{-5}$
^{106}Ru	* $1.33 \cdot 10^7$	$1.56 \cdot 10^{-2}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$4.2 \cdot 10^{-3}$
^{131}I	* $1.33 \cdot 10^7$	$1.68 \cdot 10^{-2}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$4.5 \cdot 10^{-3}$
^{134}Cs	* $1.33 \cdot 10^7$	$5.32 \cdot 10^{-2}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
^{137}Cs	* $1.33 \cdot 10^7$	$3.69 \cdot 10^{-2}$	$4.23 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^{-2}$
^{141}Ce	* $1.33 \cdot 10^7$	$1.75 \cdot 10^{-4}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$4.6 \cdot 10^{-5}$
^{144}Ce	* $1.33 \cdot 10^7$	$1.33 \cdot 10^{-3}$	* $3.53 \cdot 10^6$	$3.5 \cdot 10^{-4}$
Общая активность	$1.11 \cdot 10^{11}$	0.319	$2.911 \cdot 10^{10}$	0.090
Суммарный сброс за год (без учета ^3H)	$1.97 \cdot 10^8$		$5.33 \cdot 10^7$	

Примечания к таблице 9: * – радионуклиды не определены существующими на Курской АЭС методами и приборами. В соответствии с п. 8.8.4 МУ 2.6.5.010-2016, фактический сброс нормируемого радионуклида, значение активности которого меньше нижнего предела измерения активности, принимается равным половине от значения нижнего предела.

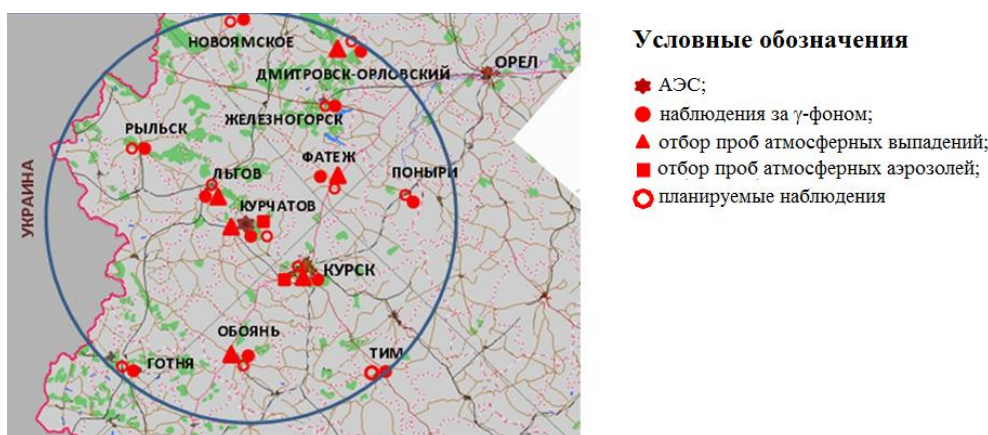
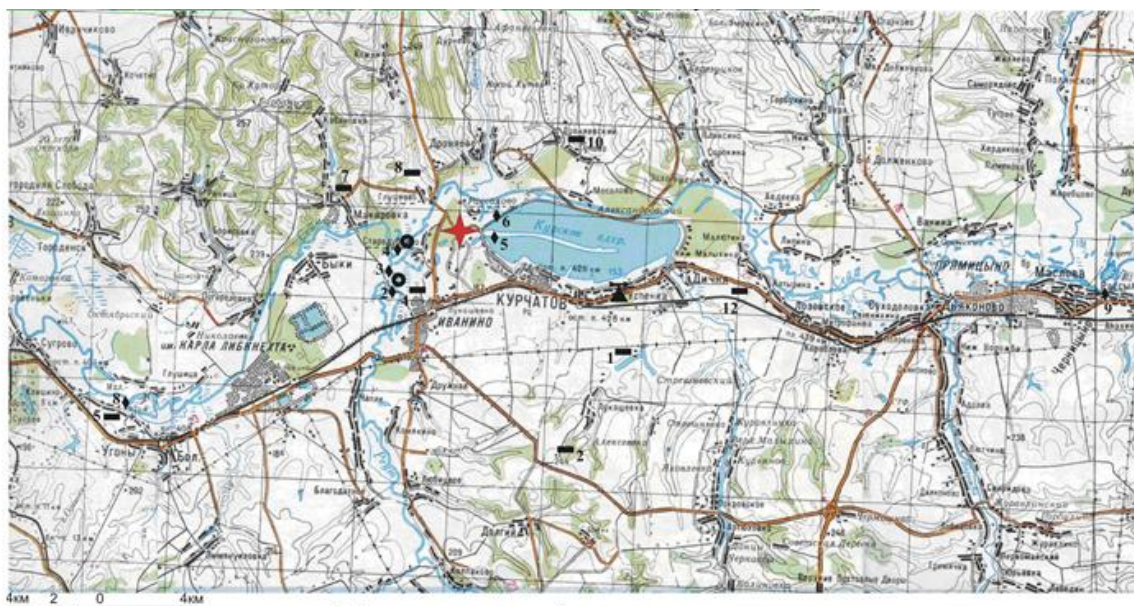


Рис. 4. Расположение пунктов радиационного мониторинга в 100-км зоне вокруг КуАЭС.

Fig. 4. Location of radiation monitoring points in the 100-km zone around the Kursk Nuclear Power Plant.



Условные обозначения

- ★ АЭС;
- отбор проб снега и растительности;
- ◆ отбор проб воды;
- сброс ХФК в р. Реут и ПЛК в р. Сейм;
- ▲ метеостанция Курчатова, наблюдения за γ -фоном;
- ▲ отбор проб атмосферных выпадений;
- ▲ отбор проб атмосферных аэрозолей;

Рис. 5. Расположение пунктов радиационного мониторинга в 20-километровой зоне вокруг КуАЭС. **Fig. 5.** Location of radiation monitoring points in the 20-km zone around the Kursk Nuclear Power Plant.

– плотности загрязнения снега в зимнее время во время маршрутных обследований в 20-км зоне КуАЭС в восьми пунктах и в фоновом пункте в г. Курске;

– уровня радиоактивного загрязнения растительности в вегетационный период (с мая по июль) во время ежемесячных маршрутных обследований в 20-км зоне КуАЭС в 9 точках, совпадающих с точками отбора снега;

– мощности экспозиционной дозы γ -излучения каждые три часа на 11 стационарных пунктах, а также при ежемесячных маршрутных обследованиях 20-км зоны КуАЭС.

Объемная активность ^{90}Sr и $^{239+240}\text{Pu}$ в объединенных за квартал пробах определялась в ФГБУ НПО «Тайфун» радиохимическим методом.

Приземная атмосфера. По данным УГМС ЦЧО за 2018 г. о зарегистрированных максимальных и среднемесячных объемных $\Sigma\beta$ активностей в воздухе приземной атмосферы в 100-км зоне КуАЭС можно сказать, что максимальное значение объемной $\Sigma\beta$ активности за год наблюдалось в г. Курске в сентябре – $117 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, в г. Курчатове в декабре – $114 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³. Среднемесячная объемная активность приземного слоя атмосферы в пунктах наблюдения колебалась от $21 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³ в январе, апреле и октябре до $51 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³ в сентябре в Курчатове, от $14 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³ в январе до $37 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³ в сентябре в Курске. Среднегодовые значения объемной $\Sigma\beta$ активности в Курске составляли $22 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, что в 1.4 раза выше полученных в 2017 г. данных, а в Курчатове увеличились в 1.6 раза и составляли $30 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, что выше уровня средневзвешенного значения по территории Центра ЕТР в 1.1 и 1.5 раза соответственно – $19.6 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³ (Радиационная обстановка ..., 2019).

«По результатам γ -спектрометрического анализа проб аэрозолей, проведенного УГМС ЦЧО, видно, что течение года среднемесячная объемная активность ^{137}Cs в атмосферных

аэрозолях в г. Курске изменялась от $2.0 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³ (февраль и март) до $57.0 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³ (октябрь) и составила в среднем за год $10.9 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, что в 1.6 раза выше среднего за 2017 г. ($6.7 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³) и в 3.2 раза выше средневзвешенной объемной активности ¹³⁷Cs для территории Центра ЕТР ($3.4 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³). В пробах аэрозолей г. Курска также наблюдались ¹³¹I, ⁵¹Cr, ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb. Среднегодовое значение активности ⁶⁰Co увеличилось в 44 раза по сравнению с 2017 г., а среднегодовое значение активности ⁵⁴Mn – увеличилось в 145 раз. В г. Курчатове среднемесячная объемная активность ¹³⁷Cs изменялась от $3.6 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³ (декабрь) до $31.2 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³ (октябрь) и составила в среднем за год $13.7 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, что в 1.1 раза выше, чем в 2017 г. ($12.3 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³), и в 4.0 раза выше средневзвешенной объемной активности ¹³⁷Cs для территории Центра ЕТР.

Кроме ¹³⁷Cs, в пробах аэрозолей в г. Курчатове в 2018 г. наблюдались ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁶⁰Co, ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb и ¹³¹I. Максимальные зарегистрированные значения объемных активностей радионуклидов были ниже нормативных ДОО_{НАС} по НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009) на шесть и более порядков» (Радиационная обстановка ..., 2019, стр. 206).

В 2018 г. среднегодовые объемные активности ⁹⁰Sr в Курске снизились в 1.4 раза по сравнению с 2017 г. и были в 1.2 раза выше средневзвешенного значения по территории Центра ЕТР, а в Курчатове увеличились в 3.1 раза по сравнению с 2017 г. и были в 1.8 раза выше уровня средневзвешенного значения по территории Центра ЕТР. Объемная активность изотопов ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в приземном слое воздуха г. Курска в 2018 г. ($1.51 \cdot 10^{-9}$ Бк/м³), что в 2.2 раза больше прошлогодних показателей, в то время как объемная активность ²³⁸Pu составила $0.24 \cdot 10^{-9}$ Бк/м³, что в 3.8 раза меньше, чем в 2017 г.

По данным ЛВРК КуАЭС, в 2018 г. радионуклидный состав атмосферного воздуха в СЗЗ и зоне наблюдения существенно не изменился. В зоне наблюдения и на контрольном пункте Селекционный регистрировался тот же состав радионуклидов, что и в СЗЗ. В зоне наблюдения содержание большинства регистрируемых радионуклидов по сравнению с 2017 г. осталось на том же уровне или увеличилось. Объемная активность ¹³⁷Cs в зоне наблюдения ($21 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³) увеличилась в 1.3 раза и в 6.2 раза превышала фоновую для Центра ЕТР ($3.4 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³). Объемные активности техногенных радионуклидов в воздухе СЗЗ, зоне наблюдения КуАЭС и контрольного пункта были на 6-7 порядков ниже допустимых уровней, установленных НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009).

В 2018 г. среднегодовые суточные значения $\Sigma\beta$ активности выпадений в 100-км зоне КуАЭС составляли $0.6-0.8$ Бк/м²·сутки, что находится примерно на уровне среднего значения для Центрально-Черноземных областей. Наибольшие годовые значения $\Sigma\beta$ выпадений были зарегистрированы в г. Курчатове – 288.0 Бк/м²·год. Максимальное суточное значение было зарегистрировано в январе в г. Курск – 5.7 Бк/м²·сутки (Радиационная обстановка ..., 2019).

В г. Курчатове в 2018 г. годовые выпадения ¹³⁷Cs были в 2.2 раза ниже средних значений на незагрязненных территориях Центра ЕТР (0.22 Бк/м²·год), а в районе точки наблюдений № 12 не отличались от них.

По данным ЛВРК АЭС, в 2018 г. среднегодовые выпадения ⁶⁰Co в зоне наблюдения Курской АЭС увеличились по сравнению с 2017 г. и составили меньше 0.03 Бк/м²·сутки. Среднегодовые выпадения ¹³⁷Cs уменьшились в 3 раза и составили 0.02 Бк/м²·сутки.

Вода, донные отложения. В 2018 г. ЛВРК КуАЭС ежемесячно при помощи ручных пробоотборников отбирала пробы воды из открытых водоемов (водоема-охладителя и р. Сейм), общий объем материалов составил не менее 40 л.

УГМС ЦЧО также ежемесячно при маршрутных обследованиях в 20-км зоне КуАЭС проводило отбор проб поверхностных вод (рис. 5), в ходе анализа ежемесячно определяло объемную $\Sigma\beta$ активность, а радионуклидный состав рассчитывало по каждой точке в объединенных за год пробах. По данным УГМС ЦЧО, в 2018 г. средние за год значения объемной $\Sigma\beta$ активности в пруде-охладителе в 2.7 раза превышали фоновое значение,

р. Сейм в 100 м ниже сброса промливневой канализации – в 1.6, р. Реут – в 1.7. Объемная $\Sigma\beta$ активность во всех точках отбора была значительно ниже контрольного уровня (1 Бк/л) по НРБ-99/2009 для питьевой воды (СанПиН ..., 2009).

По данным ЛВРК КуАЭС, в воде водоема-охладителя и р. Сейм регистрировался ^{137}Cs , активность которого составляла 10.3-21.7 Бк/м³ (Радиационная обстановка ..., 2019).

В районе КуАЭС водопотребление на коммунально-бытовые нужды осуществляется только из подземных источников. Для питьевых целей в г. Курчатове используется смешанная вода, отобранная из Тарасовского и Дичнянского водозаборов. Результаты анализов проб питьевой воды показали, что в 2018 г. объемные альфа- и бета-активности радионуклидо не превышали 0.2 и 1.0 Бк/кг соответственно.

Контроль содержания радиоактивных веществ в донных отложениях осуществлялся ЛВРК КуАЭС в сбросном канале водоема-охладителя и в 3 точках водоема-охладителя, расположенных от места сброса теплых вод до подводящего канала, а также в р. Сейм. Результаты анализа проб донных отложений показали, что удельная активность ^{137}Cs изменялась в диапазоне от <0.5 до 3.2 Бк/кг воздушно-сухой массы. Их максимальное загрязнение ^{137}Cs наблюдалось в водоеме-охладителе в районе Центра гигиены и эпидемиологии-125 и Лаборатории внешней дозиметрии и составило 3.2 Бк/кг воздушно-сухой массы. Зарегистрированные ЛВРК уровни содержания радионуклидов в донных отложениях были на 3-4 порядка ниже нормативов, установленных для КуАЭС Минприроды от 30.11.2006 (10⁴ Бк/кг для ^{137}Cs и ^{60}Co). Удельная $\Sigma\gamma$ активность радионуклидов в донных отложениях в 2018 г. сопоставима с удельной $\Sigma\gamma$, усредненной за последние 5 лет (Радиационная обстановка ..., 2019).

Для контроля содержания радионуклидов в грунтовых водах ЛВРК КуАЭС регулярно отбирала пробы воды при помощи ручных пробоотборников из контрольных скважин, расположенных вокруг хранилищ жидких отходов (ХЖО), хранилищ отработанного ядерного топлива, хранилищ жидких и твердых отходов (ХЖТО), хранилищ твердых радиоактивных отходов, по периметру вокруг главных корпусов первой и второй очереди. В 2018 г. измерение объемной $\Sigma\beta$ активности воды проводили с помощью малофоновой установки УМФ-2000 (диапазон измерений $\Sigma\beta$ активности от 0.1 до 3·10³ Бк с погрешностью не более 15%). В 2018 г. среднегодовая объемная $\Sigma\beta$ активность воды в контрольных скважинах не превышала контрольного уровня по НРБ-99/2009 – 1 Бк/л, максимальное значение – 190 Бк/м³ в скважине 4 ХЖТО (СанПиН ..., 2009).

Снег, почва, растительность. По данным УГМС ЦЧО в 2018 г. наибольшая среднегодовая объемная $\Sigma\beta$ активность радионуклидов в талой воде (69 мБк/л) наблюдалась в точке 12. Наибольшая среднегодовая плотность загрязнения снежного покрова $\Sigma\beta$ активности радионуклидов (1.2 Бк/м²) наблюдалась там же (рис. 5, табл. 10). Значения объемной $\Sigma\beta$ активности радионуклидов в талой воде и плотности загрязнения снега $\Sigma\beta$ активности в точке наблюдения 12 превысили значения в фоновой точке в 1.3 каждое. Среднегодовая объемная $\Sigma\beta$ активность в талой воде и плотности загрязнения снежного покрова $\Sigma\beta$ активности в других пунктах наблюдения в основном не превышали фоновые значения.

Пробы почвы отбирались ЛВРК КуАЭС из поверхностного слоя земли в местах расположения пунктов отбора проб атмосферных аэрозолей и выпадений. Результаты их анализа показали, что основным техногенным радионуклидом в них является ^{137}Cs . В 2018 г. средние значения поверхностной плотности ^{137}Cs в почве в СЗЗ и зоне наблюдения составляли 4.0 и 3.5 кБк/м² соответственно, в контрольном пункте (г. Льгов) – 1.1 кБк/м² при средних значениях за последние пять лет 2.6 кБк/м² для СЗЗ; 3.0 кБк/м² для зоны наблюдения и 3.0 кБк/м² для контрольного пункта. Поверхностная плотность загрязнения почвы ^{60}Co составляла 340 Бк/м² в СЗЗ, меньше 99 Бк/м² в зоне наблюдения и меньше 100 Бк/м²

в контрольном пункте (Радиационная обстановка ..., 2019).

Таблица 10. Содержание $\Sigma\beta$ в снеге в 20-км зоне вокруг КуАЭС (данные УГМС ЦЧО; Радиационная обстановка ..., 2019, с. 211). **Table 10.** The content of $\Sigma\beta$ in the snow in the 20-km zone around the the Kursk Nuclear Power Plant (data from the Territorial Administration for Hydrometeorological and Environmental Monitoring of the Central Committee of Emergencies; Радиационная обстановка ..., 2019, p. 211).

Точки отбора пробы (рис. 5)	Плотность загрязнения, Бк/м ²		Объемная активность в талой воде, мБк/л	
	2018 г.	2017 г.	2018 г.	2017 г.
т. 1 – 3 км на юго-запад от д. Дичня	0.7	0.8	44	40
т. 2 – 0.6 км на юго-запад от д. Лукашевка	0.7	2.3	43	70
т. 4 – северная окраина д. Иванино	0.8	1.9	45	80
т. 5 – западная окраина д. Большие Угоны	0.4	3.2	24	110
т. 7 – северо-восточный выезд из д. Макаровка	0.3	1.8	18	70
т. 8 – 3 км на восток от д. Макаровка	0.6	4.2	68	170
т. 10 – 0.5 км к востоку от п. Дроняевский	0.8	2.9	46	130
т. 12 – 2 км к востоку от д. Дичня	1.2	1.8	69	50
т. 13 – метеостанция г. Курск (фон)	0.9	1.0	52	60

Радиоактивное загрязнение растительного покрова в районе возможного влияния газоаэрозольных выбросов из вентиляционной трубы АЭС в 2018 г. контролировалось УГМС ЦЧО при ежемесячных маршрутных обследованиях в 20-км зоне КуАЭС с мая по июль в восьми точках, совпадающих с точками отбора проб снега (рис. 5), и на аэрологической станции в Курске (фоновая точка). В пробах растительности регулярно определялась удельная активность ¹³⁷Cs и природных радионуклидов ⁴⁰K, ⁷Be, ²¹⁰Pb, ²³²Th. Среднее содержание ¹³⁷Cs в растительности в 2018 г. составило 1.1 Бк/кг в.-с., что в 1.1 раза ниже значения 2017 г. (1.2 Бк/кг в.-с.). В целом, в 2018 г. среднегодовые значения активностей техногенных и природных радионуклидов незначительно отличались от средних значений 2017 г., однако в некоторых точках превышали фоновые значения.

В 2018 г. ЛВРК КуАЭС для анализа на содержание радионуклидов отобрала продукты питания местного производства. Удельная активность ¹³⁷Cs в них оказалась намного ниже нормативов (СанПиН ..., 2001): яблоки – <1.1 Бк/кг сырой массы, грибы – 3.8 Бк/кг, картофель – <1.1 Бк/кг, рыба – меньше 0.8 Бк/кг, пшеница – <1.0 Бк/кг, ячмень – <1.2 Бк/кг, овес – <1.5 Бк/кг, свекла – <1.2 Бк/кг, мясо – <1.1 Бк/кг, молоко – <0.8 Бк/кг. Содержание ¹³¹I в молоке составило менее 0.5 Бк/кг сырой массы. Полученные значения удельной активности радионуклидов сопоставимы с уровнями активностей продуктов питания в 2017 г. (Радиационная обстановка ..., 2019).

Радиационный фон на местности. По данным ежемесячных измерений МАЭД, проводимых УГМС ЦЧО во время маршрутных обследований 20-км зоны вокруг КуАЭС, в 2018 г. МАЭД изменялась в пределах от 0.08 до 0.18 мкЗв/ч при среднем значении за год 0.13 мкЗв/ч, что соответствует колебаниям естественного γ -фона. Среднемесячные значения МАЭД в 100-км зоне, по данным 12 пунктов наблюдения, находились на уровне предыдущих лет и изменялись от 0.10 до 0.15 мкЗв/ч (Фатеж). Максимальные суточные значения МАЭД не превышали 0.18 мкЗв/ч.

По данным автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) КуАЭС, в 2018 г. среднегодовая величина МАЭД в СЗЗ и зоне наблюдения составила 0.10 и

0.11 мкЗв/ч соответственно. По измерениям, проводимым во время регламентных маршрутных обследований, среднегодовое значение МАЭД в СЗЗ и зоне наблюдения составило 0.12 мкЗв/ч, что незначительно отличается по величине от значений МАЭД предпускового периода станции в 1975 г. – 0.11 мкЗв/ч. Среднее значение МАЭД на промплощадке составило 0.19 мкЗв/ч (Радиационная обстановка ..., 2019).

Годовая доза на местности в зоне наблюдения КуАЭС изменялась от $1.06 \cdot 10^{-3}$ Зв до $1.10 \cdot 10^{-3}$ Зв, т.е. на уровне значения $1.11 \cdot 10^{-3}$ Зв в контрольном п. Селекционный, расположенном в 30 км от АЭС. Для населения, проживающего в зоне наблюдения КуАЭС, были рассчитаны радиационные риски от поступления техногенных радионуклидов в организм человека (от ингаляции, потребления воды, потребления продуктов питания) и внешнего облучения от почвы. Среднегодовой суммарный риск за период 2000-2018 г. составил $3.3 \cdot 10^{-7}$, что не превышает уровня пренебрежимо малого риска 10^{-6} .

Представленные данные позволяют сделать вывод, что воздействие Курской АЭС на радиационную обстановку в районе ее расположения незначительно. В 2018 г. по сравнению с 2017 г. в 3.8 раза увеличились сбросы трития в реку Сейм, не превысившие, однако, 0.13% от допустимых. Согласно данным мониторинга, в приземном воздухе Курска и Курчатова в 2018 г. наблюдались техногенные радионуклиды ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{131}I , отсутствующие в составе глобального фона. Однако их объемные активности были на 7-8 порядков ниже допустимых по НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009).

29 апреля 2018 года положено начало в строительстве станции замещения – КуАЭС-2, поскольку существует необходимость в сохранении и развитии электрической и тепловой энергии, а ресурс реакторов первой очереди в скором времени будет исчерпан. Планируется построить два энергоблока ВВЭР-ТОИ (водо-водяной энергетический реактор – типовой оптимизированный информатизированный поколения III+) с проектной мощностью 2510 МВт (Сайт Курской АЭС).

Нововоронежская атомная станция (НВАЭС) является первой из отечественных атомных станций с реакторами типа ВВЭР. Она расположена на левом берегу р. Дон в Каширском районе Воронежской области. Энергоблоки №№ 1 и 2 остановлены в 1984 и 1990 гг. Из этих энергоблоков вывезено ядерное топливо, и они переведены в ядерно-безопасное состояние. В настоящее время в эксплуатации находятся три энергоблока. С 1995 г. на НВАЭС осуществляется поэтапная модернизация энергоблоков для приведения их в соответствие с современными стандартами безопасности. На энергоблоках № 3 и №4 впервые в Европе был выполнен уникальный комплекс работ по продлению сроков эксплуатации на 15 лет (до 2016 и 2017 гг. соответственно), получены соответствующие лицензии Ростехнадзора. 27 февраля 2017 г. в эксплуатацию был введен энергоблок №1 Нововоронежской АЭС-2 (блок № 6 НВАЭС-2), а 31 октября 2019 года – энергоблок № 2 (блок № 7 НВАЭС-2; АО «Концерн Росэнергоатом»).

Поскольку выбросы на АЭС осуществляются через вентиляционные трубы энергоблоков, вентиляционная система горячей камеры и хранилища радиоактивных отходов, граница СЗЗ вокруг НВАЭС представляет собой объединение двух окружностей: одна радиусом 2.25 км – от вентиляционных труб 3 и 4 энергоблоков, другая радиусом 2 км от трубы блока № 5. Площадь СЗЗ составляет приблизительно 18 км².

Граница СЗЗ блоков № 6 и №7 (№ 1 и №2 НВАЭС-2) определена в границах, образованных периметром ограждения площадки 6 и 7 блоков общей площадью 76.79 га, и находится внутри СЗЗ Нововоронежской АЭС.

Зона наблюдения имеет радиус 20 км с центром на середине линии, соединяющей вентиляционные трубы 3, 4 и 5 энергоблоков. Внешняя граница СЗЗ совпадает с внутренней границей зоны наблюдения, площадь которой – приблизительно 2826 км². Зона наблюдения блоков № 6 и №7 (№ 1 и №2 НВАЭС-2) имеет радиус 13 км и находится внутри зоны

наблюдений НВАЭС (Радиационная обстановка ..., 2019).

На правом берегу р. Дон находятся два населенных пункта – с. Архангельское и д. Пашенково, на окраине которых несколько жилых домов расположены на внешней границе СЗЗ. К северу от промплощадки на расстоянии 3-7 км расположен г. Нововоронеж, а в 45 км к северу и в 50 км к юго-востоку находятся два крупных населенных пункта: г. Воронеж (около 1039 тыс. жителей) и г. Лиски (54 тыс. жителей).

В 2018 г. по сравнению с 2017 г. годовые выбросы таких изотопов, как ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , и инертных радиоактивных газов уменьшились в 11.1, 1.5, 1.3 и 3 раза соответственно, а поступление в атмосферу ^{60}Co увеличилось в 2.5 раза. Число нормируемых радионуклидов увеличилось. В частности, в 2018 г. осуществлялся контроль выбросов таких радиологически значимых радионуклидов, как углерод-14 и тритий, поступление в атмосферу которых составило соответственно 0.24 и 0.046% от допустимых выбросов. Выбросы остальных контролируемых радионуклидов также были значительно ниже допустимых. В 2018 г. не наблюдалось случаев превышения суточных контрольных уровней выбросов радионуклидов.

Основными источниками водопользования в районе НВАЭС являются р. Дон, пруд-охладитель блока № 5, пруды рыборазводного хозяйства «Нововоронежский» (рыбхоз), артезианские водозаборы подземных вод. Наливной пруд-охладитель блока № 5 расположен в пойме р. Дон выше береговой насосной станции. Он используется не только для нужд НВАЭС, но и населением г. Нововоронежа для рыбохозяйственных, рекреационных и других целей (Радиационная обстановка ..., 2019).

Данные по водоотведению и сбросу радионуклидов со сточными водами НВАЭС с учетом разгрузки подземных вод представлены в таблице 11. В соответствии с ними годовые сбросы ^{137}Cs в открытую гидрографическую сеть (р. Дон) в 2018 г. не превышали 3.8% от допустимого сброса, в пруд-охладитель – 21.4%, в рыборазводник «Воронежский» – 18.8%. Годовой сброс ^{60}Co в р. Дон с загрязненными подземными водами из района ХЖО-2 в 2018 г. не превышал 1.6% от допустимого сброса, в пруд-охладитель – 33.3%, в рыборазводник «Нововоронежский» – 8.1%.

В соответствии с требованиями пункта 4.1 «Положения о годовых отчетах по оценке состояния безопасной эксплуатации энергоблоков атомных станций» (СТО 1.1.1.04.001.0143-2015, 2015), в случае, если существующими на АЭС приборами и методами некоторые радионуклиды, нормируемые в сбросах, не определяются, фактическому сбросу нормируемого радионуклида присваивается значение 1/2 произведения нижнего предела измерения на суммарный объем сброса. В число таких радионуклидов (в сбросах на поля фильтрации НВАЭС и в р. Дон) входят ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce , ^{144}Ce .

Радиационный мониторинг окружающей среды вокруг НВАЭС в радиусе до 50 км проводится ЛВРК НВАЭС, а в радиусе до 100 км – УГМС ЦЧО.

По данным ежегодного издания ФГБУ НПО «Гайфун» (Радиационная обстановка ..., 2019, стр. 224), «в 2018 г. ЛВРК НВАЭС контролировались следующие характеристики радиоактивного загрязнения окружающей среды:

– объемная активность радионуклидов в приземном слое воздуха – на 7 стационарных постах, один из которых расположен на промплощадке, два – в СЗЗ, три – в зоне наблюдения и один – в контрольном пункте (г. Лиски в 50 км в юго-восточном направлении от АЭС). Пробы отбирались непрерывно с помощью стационарных аспирационных установок типа ФВА-49;

– радиоактивность атмосферных выпадений – на 20 стационарных постах, расположенных на промплощадке, в СЗЗ и в контрольном пункте (г. Лиски), с помощью кювет с площадью 0.25 м² и высотой бортиков 10 см, в качестве сорбирующей поверхности использовалась фильтровальная беззольная бумага, время экспозиции 7-10 дней;

– содержание техногенных радионуклидов в воде открытых водоемов, донных отложениях, рыбе открытых водоемов, в подземных водах на территории промплощадки и

СЗЗ, а также в питьевой артезианской воде;

– содержание радионуклидов в почве, в сельскохозяйственной продукции местного производства (молоке, мясе, рыбе, зерне, картофеле);

– МАЭД с помощью системы АСКРО НВАЭС, состоящей из 22 постов, и во время маршрутных обследований;

– годовая поглощенная доза γ -излучения на местности на 33 стационарных дозиметрических постах.

Таблица 11. Годовые сбросы радионуклидов на НВАЭС, Бк (Радиационная обстановка ..., 2019, с. 223). **Table 11.** Annual discharges of radionuclides at the Novovoronezh Nuclear Power Plant, Bq (Радиационная обстановка ..., 2019, p. 223).

Приемник сточных вод	Наименование радионуклида	Допустимый сброс	Фактический сброс		Увеличение (+), снижение (-) сбросов в 2018 г. по сравнению с 2017 г.
			2018 г.	2017 г.	
р. Дон	^3H	$1.0 \cdot 10^{15}$	$8.4 \cdot 10^{11}$	$9.5 \cdot 10^{11}$	$-1.1 \cdot 10^{11}$
	^{60}Co	$1.1 \cdot 10^{11}$	$1.8 \cdot 10^9$	$2.0 \cdot 10^9$	$-1.9 \cdot 10^8$
	^{131}I	$2.5 \cdot 10^{11}$	$1.5 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^9$	$-3.4 \cdot 10^8$
	^{134}Cs	$4.6 \cdot 10^9$	$2.9 \cdot 10^8$	$3.7 \cdot 10^8$	$-7.8 \cdot 10^7$
	^{137}Cs	$7.6 \cdot 10^9$	$2.9 \cdot 10^8$	$3.7 \cdot 10^8$	$-7.8 \cdot 10^7$
Пруд-охладитель блока № 5	^3H	$8.2 \cdot 10^{13}$	$9.2 \cdot 10^{11}$	$9.2 \cdot 10^{11}$	0
	^{60}Co	$6.6 \cdot 10^9$	$2.2 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^9$	$+4.5 \cdot 10^8$
	^{131}I	$5.3 \cdot 10^{11}$	$2.2 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^9$	$+4.5 \cdot 10^8$
	^{134}Cs	$1.9 \cdot 10^9$	$4.5 \cdot 10^8$	$3.5 \cdot 10^8$	$+1.0 \cdot 10^8$
	^{137}Cs	$2.1 \cdot 10^9$	$4.5 \cdot 10^8$	$3.5 \cdot 10^8$	$+1.0 \cdot 10^8$
Хозфекальная канализация, поля фильтрации НВАЭС	^3H	$7.5 \cdot 10^{13}$	$1.5 \cdot 10^{13}$	$1.7 \cdot 10^{13}$	$-2.3 \cdot 10^{12}$
	^{60}Co	$9.6 \cdot 10^9$	$2.3 \cdot 10^7$	$1.8 \cdot 10^7$	$+4.3 \cdot 10^6$
	^{131}I	$1.3 \cdot 10^{12}$	$1.6 \cdot 10^7$	$1.9 \cdot 10^7$	$-3.4 \cdot 10^6$
	^{134}Cs	$9.6 \cdot 10^9$	$1.6 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^7$	$+8.0 \cdot 10^5$
	^{137}Cs	$7.5 \cdot 10^{10}$	$3.1 \cdot 10^7$	$2.1 \cdot 10^7$	$+1.1 \cdot 10^7$
Водовыпуск системы продувки, р. Дон	^3H	$1.0 \cdot 10^{15}$	$4.8 \cdot 10^{12}$	$8.6 \cdot 10^{12}$	$-3.8 \cdot 10^{12}$
	^{60}Co	$2.4 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^8$	$2.9 \cdot 10^8$	$-1.8 \cdot 10^8$
	^{13}I	$6.3 \cdot 10^{11}$	$7.2 \cdot 10^7$	$3.2 \cdot 10^8$	$-2.5 \cdot 10^8$
	^{134}Cs	$1.5 \cdot 10^{10}$	$7.5 \cdot 10^7$	$2.9 \cdot 10^8$	$-2.2 \cdot 10^8$
	^{137}Cs	$2.4 \cdot 10^{10}$	$8.5 \cdot 10^7$	$3.0 \cdot 10^8$	$-2.1 \cdot 10^8$
Рыбопитомник «Нововоронежский»	^3H	$1.0 \cdot 10^{13}$	$1.6 \cdot 10^{10}$	$1.8 \cdot 10^{10}$	$-1.9 \cdot 10^9$
	^{60}Co	$7.0 \cdot 10^8$	$5.7 \cdot 10^7$	$3.8 \cdot 10^7$	$+1.9 \cdot 10^7$
	^{131}I	$5.0 \cdot 10^{10}$	$3.8 \cdot 10^7$	$3.8 \cdot 10^7$	$+2.0 \cdot 10^5$
	^{134}Cs	$4.6 \cdot 10^7$	$7.6 \cdot 10^6$	$7.6 \cdot 10^6$	$+5.0 \cdot 10^4$
	^{137}Cs	$4.2 \cdot 10^7$	$7.9 \cdot 10^6$	$7.6 \cdot 10^6$	$+3.5 \cdot 10^5$

В 2018 г. УГМС ЦЧО в 100-км зоне вокруг НВАЭС проводило наблюдения (рис. 6):

– за объемной активностью радионуклидов в воздухе г. Нововоронежа путем отбора проб с помощью воздухо-фильтрующей установки «Тайфун-3А» на ткань ФПП-15-1.5 с экспозицией 5 дней;

– за радиоактивностью атмосферных выпадений в 5 пунктах с помощью горизонтальных

планшетов с суточной экспозицией;

– МАЭД на 13 стационарных постах каждые три часа».

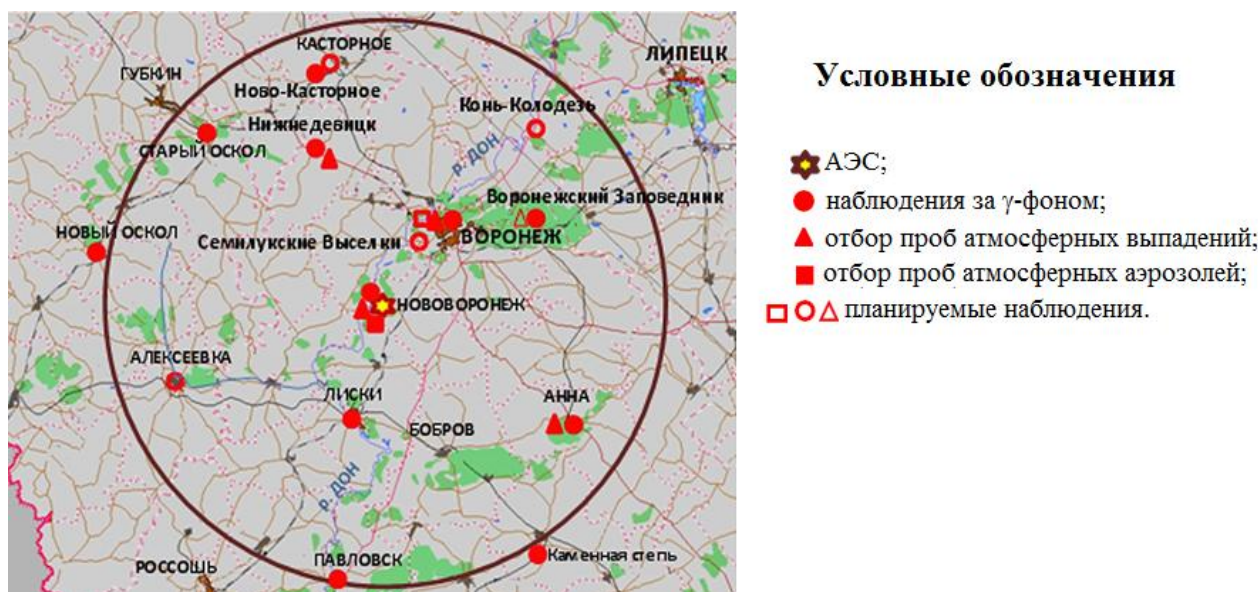


Рис. 6. Расположение пунктов радиационного мониторинга в 100-км зоне вокруг НВАЭС.
Fig. 6. Location of radiation monitoring points in the 100-km zone around the Novovoronezh Nuclear Power Plant.

Приземная атмосфера. По данным ЛВРК НВАЭС, в 2018 г. по сравнению с 2017 г. состав атмосферного воздуха в СЗЗ и зоне наблюдения существенно не менялся по качественному составу радионуклидный. В СЗЗ среднегодовые объемные активности ^{60}Co и ^{137}Cs уменьшились в 1.3 и 1.6 раза соответственно, а активности ^{54}Mn и ^{58}Co увеличились в 5.9 и 1.7 раза соответственно. В зоне наблюдения среднегодовые объемные активности ^{58}Co были ниже минимально детектируемой активности, среднегодовые объемные активности ^{60}Co и ^{137}Cs увеличились в 2.7 и 1.2 раза по сравнению с предыдущим годом. Объемная активность ^{137}Cs в СЗЗ, зоне наблюдения и контрольном пункте изменялась в пределах $(15.5-20.0) \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, что примерно в 4.6-5.9 раз выше средневзвешенной объемной активности для Центра ЕТР – $3.4 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³.

Согласно данным УГМС ЦЧО (Радиационная обстановка ..., 2019), в 2018 г. объемная $\Sigma\beta$ активность в приземном слое атмосферы составила $18.3 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, что в 1.1 раза ниже средневзвешенной активности в центре ЕТР – $19.6 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³. Среднегодовые суточные значения $\Sigma\beta$ активности выпадений в 2018 г. в различных пунктах 100-км зоны немного уменьшились по сравнению с 2017 г. и были чуть ниже среднегодового фонового значения для Центра ЕТР – 0.9 Бк/м²·сутки. Максимальные суточные значения $\Sigma\beta$ активности выпадений наблюдались в п. Лиски в январе и составили 5.2 Бк/м²·сутки.

Из радионуклидов техногенного происхождения в пробах выпадений в г. Нововоронеже и в зоне № 13³ присутствовал ^{137}Cs . Его годовые выпадения в 2018 г. в городе уменьшились в 7.5 раз по сравнению с 2017 г., в зоне № 13 – в 7.5 раз и составили 0.06 Бк/м²·год.

По данным ЛВРК НВАЭС (Радиационная обстановка ..., 2019), в 2018 г. ^{137}Cs и ^{60}Co регистрировались в выпадениях в СЗЗ и контрольном пункте (Лиски). Выпадения составили

³ Зона 13 – это 100 км зона в окружении НВАЭС, в которую входят точки наблюдения на метеостанциях Анна, Воронеж, Лиски и Нижнедевицк (метеостанции расположены в этой зоне).

1.4 и 0.6 Бк/м²·год соответственно, в контрольном пункте – 1.2 и 0.4 Бк/м²·год. При этом общая активность выпадения радионуклидов в 2018 г. в СЗЗ немного увеличилась по сравнению с предыдущим годом, а в контрольном пункте Лиски уменьшилась в 2.1 раза.

Вода и другие объекты окружающей среды. Содержание радионуклидов в воде открытых водоемов в 2018 г. определялось ЛВРК НВАЭС в местах постоянного мониторинга: в р. Дон – в 7 точках, в пруде-охладителе – в 2 точках и в пруде рыбхоза – в одной точке.

В 2018 г. объемная активность ¹³⁷Cs в воде р. Дон, пруда-охладителя и рыбопроизводных прудах рыбхоза «Нововоронежский» почти не изменилась по сравнению с уровнем 2017 г., колеблясь в диапазоне от 6 до 8 Бк/м³, что на 3 порядка ниже уровня вмешательства при поступлении радионуклидов с водой для населения по НРБ-99/2009 – 11 Бк/л (СанПиН ..., 2009). Объемная активность ⁶⁰Co в поверхностных водах в 2018 г. была ниже предела обнаружения. Объемная активность трития в поверхностных водах составляла от 4 (6 км выше сброса блоков № 1 и №2) до 209 Бк/кг (Старица).

Содержание ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co в питьевой воде водозабора НВАЭС и водозабора профилактория НВАЭС было ниже предела обнаружения, содержание трития – 2 Бк/кг (Радиационная обстановка ..., 2019).

ЛВРК НВАЭС также проводит мониторинг содержания техногенных радионуклидов в донных отложениях р. Дон, пруда-охладителя и рыбопроизводных прудов рыбхоза «Нововоронежский». Наличие ⁶⁰Co в отложениях, отобранных в р. Дон ниже устья сбросного канала блоков № 1 и №2 и в рыбопроизводных прудах рыбхоза «Нововоронежский», по данным АЭС, прослеживается с 1995 г. Удельные активности ¹³⁷Cs и ⁶⁰Co в отложениях рыбопроизводного пруда в 2018 г. составили 3.6 и 0.3 Бк/кг в.-с. соответственно. В пруде-охладителе удельная активность ¹³⁷Cs в отложениях составила 0.8-1.0 Бк/кг воздушно-сухой массы. В р. Дон удельная активность ¹³⁷Cs изменялась в диапазоне от 1.3 до 16.0 Бк/кг воздушно-сухой массы; ⁶⁰Co – от предела обнаружения до 29.0 Бк/кг воздушно-сухой массы (в сбросном канале блоков № 1 и №2).

Мониторинг грунтовых вод на участке радиоактивного загрязнения в районе ХЖО-2 в 2018 г. проводился ЛВРК в 17 контрольных скважинах. Загрязнение подземных вод в районе ХЖО-2 по-прежнему в основном обусловлено ⁶⁰Co. В воде в 12-и контрольных скважинах из 17-и был обнаружен ⁶⁰Co, среднегодовая объемная активность которого изменялась от 0.2 до 9.0 Бк/кг, что находится ниже уровня вмешательства по среднегодовому содержанию в воде ⁶⁰Co – 40 Бк/л по НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009). В других скважинах как в зоне загрязнения, так и вне зоны, объемная активность ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs и ³H в воде была значительно ниже критерия уровня вмешательства при поступлении радионуклидов с водой для населения по НРБ-99/2009⁴ (Радиационная обстановка ..., 2019).

Плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs в 2018 г. в СЗЗ и зоне наблюдения отсоставляла 1.5 и 2.5 кБк/м² соответственно, в контрольном пункте Лиски – 3.9 кБк/м². Такие показатели объясняются последствиями радиоактивных выпадений после аварии на Чернобыльской АЭС.

Содержание ¹³⁷Cs в местной сельскохозяйственной продукции в 2018 г. было более чем на 3 порядка ниже нормативов (СанПиН ..., 2001). Наибольшие значения отмечены в мясе – 0.14 Бк/кг, в то время как в картофеле и пшенице содержание радионуклида было ниже предела обнаружения, в молоке содержание ¹³⁷Cs составило 0.03 Бк/кг сырой массы, ¹³¹I в молоке контрольного стада не обнаружен.

Среднегодовые значения МАЭД в 2018 г. вне загрязненных участков в СЗЗ и зоне наблюдения, по данным АСКРО НВАЭС, составляли 0.09-0.10 мкЗв/ч. По данным наблюдений УГМС ЦЧО (Радиационная обстановка ..., 2019), в 100-км зоне вокруг НВАЭС

⁴ НРБ-99/2009 – санитарные нормы, регламентирующие допустимые уровни воздействия ионизирующего излучения и другие требования по ограничению облучения человека (СанПин 2.6.1.2523-09)

в 2018 г. среднемесячные значения МАЭД изменялись от 0.08 до 0.15 мкЗв/ч. Максимальное измеренное значение МАЭД наблюдалось в пп. Старый Оскол и Нижнедевицк – 0.17 мкЗв/ч. Эти значения практически не отличаются от результатов 2017 г.

Годовая накопленная доза внешнего облучения, по данным ЛВРК НВАЭС, в зоне наблюдения варьировала в диапазоне 0.52-1.04 мЗв, что несколько выше в некоторых пунктах наблюдений значения, полученного в контрольном пункте Лиски, – 0.62 мЗв. В СЗЗ годовая доза внешнего облучения варьировала в диапазоне 0.54-0.90 мЗв.

Для населения, проживающего в зоне наблюдения НВАЭС, были рассчитаны радиационные риски от поступления техногенных радионуклидов в организм человека (от ингаляции, потребления воды, потребления продуктов питания) и внешнего облучения от почвы по методике И.И. Крышева с соавторами (2014). Среднегодовой суммарный дополнительный риск для населения за период 2000-2018 гг. составил $9.0 \cdot 10^{-8}$, что не превышает значения пренебрежимо малого риска 10^{-6} (Радиационная обстановка ..., 2019).

Из анализа приведенных выше данных следует, что НВАЭС оказывает незначительное влияние на радиационную обстановку. Обнаружено присутствие ^{60}Co в донных отложениях р. Дон и рыбопитомнике «Нововоронежский». В 2018 г. в приземной атмосфере СЗЗ и зоне наблюдения НВАЭС наблюдались отсутствующие в составе глобального радиоактивного фона ^{60}Co , ^{54}Mn , был превышен региональный уровень по объемной активности ^{137}Cs . Наблюдаемые объемные активности контролируемых радионуклидов в приземном воздухе на 7-8 порядков ниже нормативных уровней, установленных НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009).

Смоленская атомная станция (САЭС) расположена на юге Смоленской области, в 3 км от г. Десногорска и в 35 км от г. Рославля. Ближайшие региональные центры находятся на следующем удалении от станции: Смоленск – 150 км, Брянск – 180 км. Основная река в районе расположения станции – Десна с притоками, впадающая в р. Днепр, на которой для промышленного водоснабжения построено водохранилище площадью зеркала 42.2 км². Плотины расположены в месте впадения в р. Десну ее правого притока р. Сельчанки, в 7 км от п. Екимовичи. На САЭС эксплуатируются три энергоблока (№№ 1 и 2 – первая очередь, № 3 – вторая очередь), введенные в эксплуатацию в 1982, 1985 и 1990 гг. соответственно, с уран-графитовыми канальными реакторами РБМК-1000 одноконтурного типа общей проектной электрической мощностью 3000 МВт (Радиационная обстановка ..., 2019).

СЗЗ САЭС определена кругом радиусом 3 км. Размер зоны наблюдения для первой и второй очереди станции определен кругом радиусом 30 км с центром по оси вентиляционной трубы главного корпуса первой очереди. Площадь зоны наблюдения – 2797.7 км². Численность населения, проживающего в этой зоне, составляет 125.9 тыс. человек: городское – 104.7 тыс., сельское – 21.2 тыс.

В конце 2017 г. введен в эксплуатацию комплекс переработки радиоактивных отходов Смоленской АЭС. На территории промплощадки второй очереди находится комплекс зданий, входящих в систему обращения радиоактивных отходов, в которую входят ХЖТО, ХЖО и ХЖО-2. Для хранения отработавшего ядерного топлива оборудовано ХОЯТ, расположенное на территории промплощадки второй очереди.

Радионуклиды поступают в окружающую среду с газоаэрозольными выбросами через вентиляционные трубы (ВТ-1, ВТ-2), данные о содержании подконтрольных радионуклидов в газоаэрозольных выбросах САЭС в 2018 г. представлены в таблице 12.

В 2018 г. значения всех годовых выбросов не превышали установленных нормативов. Выбросы ^{60}Co , ^{134}Cs и ^{137}Cs составляли 2.4, 0.84 и 0.44% от допустимых выбросов соответственно, что выше прошлогодних значений. Выбросы ^3H составили менее 0.001%. Наибольший вклад в абсолютную величину активности выброса вносили ИРГ. Среднесуточные и среднемесячные выбросы регламентируемых радионуклидов не превышали установленных контрольных уровней для САЭС (Радиационная обстановка ..., 2019).

В качестве водоема-охладителя на САЭС используется Десногорское водохранилище. Поступление туда радионуклидов с дебалансными водами САЭС реализуется следующим образом: из контрольных баков чистого конденсата через техводовод и закрытый отводящий канал в р. Сельчанка и/или р. Гнездна и далее в водоем-охладитель; из баков душевых вод санпропускников через очистные сооружения хозяйственной канализации в водоем-охладитель; из приемков грунтовых вод машинных залов и баков приемки вод пожаротушения через очистные сооружения промливневой канализации – в водоем-охладитель.

Таблица 12. Выбросы регламентируемых радионуклидов в атмосферу на САЭС, Бк (Радиационная обстановка ..., 2019, с. 235). **Table 12.** Emissions of regulated radionuclides into the atmosphere at the Smolensk Nuclear Power Plant, Bq (Радиационная обстановка ..., 2019, p. 235).

Наименование радионуклида	Допустимый выброс	Фактический выброс		Увеличение (+), снижение (-) выбросов в 2018 г. по сравнению с 2017 г.
		2018 г.	2017 г.	
Сумма ИРГ	$2.69 \cdot 10^{16}$	$5.91 \cdot 10^{14}$	$6.58 \cdot 10^{14}$	$-6.70 \cdot 10^{13}$
^3H	$1.18 \cdot 10^{15}$	$7.68 \cdot 10^9$	—*	—
^{60}Co	$2.50 \cdot 10^9$	$5.96 \cdot 10^7$	$1.58 \cdot 10^7$	$+4.38 \cdot 10^7$
^{131}I	$9.30 \cdot 10^{10}$	$9.99 \cdot 10^7$	$1.35 \cdot 10^8$	$-3.51 \cdot 10^7$
^{134}Cs	$1.40 \cdot 10^9$	$1.17 \cdot 10^7$	$8.31 \cdot 10^6$	$+3.39 \cdot 10^6$
^{137}Cs	$4.00 \cdot 10^9$	$1.77 \cdot 10^7$	$1.66 \cdot 10^7$	$+1.10 \cdot 10^6$

Примечания к таблице 12: * – данные отсутствуют.

Общий объем сброса сточных вод в 2018 г. составил 64689 м^3 . Наибольший вклад в активность сброса вносил тритий, его сброс вырос в 1.3 раза по сравнению с прошлым годом, но при этом составил 1% от допустимого. Активности остальных нормируемых нуклидов были ниже минимально детектируемой активности, а их расчетные величины сбросов составили менее 0.07% от допустимых (Радиационная обстановка ..., 2019).

Радиационный мониторинг окружающей среды в СЗЗ и зоне наблюдения САЭС осуществляется ЛВРК САЭС, а в 100-км зоне САЭС – Центральным УГМС и УГМС ЦЧО, а также Республиканским центром радиационного контроля и мониторинга окружающей среды Республики Беларусь.

В СЗЗ и зоне наблюдения САЭС в 2018 г. ЛВРК САЭС осуществлялся контроль следующих характеристик окружающей среды (Радиационная обстановка ..., 2019, стр. 236):

- объемной активности радиоактивных аэрозолей в приземном слое атмосферы аспирационным методом с экспозицией 10 дней с использованием установок «Тайфун-4», расположенных на постах постоянного наблюдения;

- активности радиоактивных выпадений на местности с помощью кювет, установленных в СЗЗ на территории очистных сооружений и ЗН, экспонируемых в течение 30 дней;

- содержания радионуклидов в воде открытых водоемов, донных отложениях и рыбе открытых водоемов в районе САЭС, а также в питьевой водопроводной воде;

- объемной активности радионуклидов в воде контрольных скважин вокруг ХЖТО, ХЖО, ХЖО-2, ХОЯТ;

- содержания радионуклидов в почве в пунктах постоянного наблюдения. Пробы отбирались один раз в год;

- содержания радионуклидов в продуктах питания, производящихся в хозяйствах, расположенных в зоне наблюдения САЭС. Отбор проб проводился один раз в год после

сбора урожая;

- МАЭД γ -излучения на постах постоянного наблюдения с периодичностью один раз в 10 дней переносными приборами, а также непрерывно с помощью системы АСКРО САЭС;
- годовой поглощенной дозы на местности термомюлюминесцентными дозиметрами ТЛД-500К в корпусе ДПГ-03, размещенными на 25 постах постоянного наблюдения и в населенных пунктах 30-км зоны АЭС».

В 100-км зоне САЭС в 2018 г. Центральное УГМС и УГМС ЦЧО проводили наблюдения за МАЭД на 7 стационарных пунктах и за атмосферными выпадениями на четырех (рис. 7). Центр радиационного контроля Республики Беларусь измерял МАЭД на юго-западе зоны в г. Мстиславле (рис. 7), контролировал радиоактивные выпадения из приземного слоя атмосферы (отбор проб производился с помощью горизонтальных планшетов) с определением суммарной бета-активности, а также производил ежедневный отбор проб радиоактивных аэрозолей в приземном слое атмосферы.



Рис. 7. Расположение пунктов радиационного мониторинга в 100-км зоне вокруг САЭС.

Fig. 7. Location of radiation monitoring points in the 100-km zone around the Smolensk Nuclear Power Plant.

Техногенный радионуклид ^{60}Co , отсутствующий в составе глобального радиоактивного фона, регистрировался как в СЗЗ, так и в зоне наблюдения САЭС. Его содержание в СЗЗ было в 6.5 раза больше, чем в зоне наблюдения. Среднегодовая объемная активность ^{134}Cs в 2018 г. ниже минимально детектируемой активности в обеих зонах. Значение среднегодовой объемной активности ^{137}Cs в 2018 г. по сравнению с 2017 г. выросло в 2.1 раза в СЗЗ и в 2.4 раза в зоне наблюдения. Его среднегодовая объемная активность в обеих зонах АЭС в 2018 г. была в 4.6 и 3 раза соответственно выше средневзвешенного значения, наблюдавшегося в Центре ЕТР – $3.4 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³. В целом, в 2018 г. объемные активности всех радионуклидов в воздухе СЗЗ и зоне наблюдения были на 6-7 порядков ниже допустимых по НРБ-99/2009 (СанПиН ..., 2009).

Радиационный мониторинг в Калужской области

Радиационную обстановку в Калужской области определяют вторичный ветровой перенос глобальных радиоактивных выпадений, обусловленных проведенными ранее

ядерными взрывами, а также радиоактивных выпадений, обусловленных аварией на Чернобыльской АЭС. Дополнительно на локальном уровне прослеживается влияние радиационно-опасных объектов.

В регионе имеются территории, загрязненные вследствие аварии на Чернобыльской АЭС и расположенные в Жиздринском, Людиновском, Ульяновском, Хвастовичском, Думиничском, Кировском, Козельском, Куйбышевском и Мещовском районах. За 30 лет уровни загрязнения данных территорий ^{137}Cs значительно уменьшились, в основном за счет его естественного радиоактивного распада и миграции вглубь почвы.

В 2018 году радиационный мониторинг на территории Калужской области проводился Росгидрометом на стационарных постах наблюдения, с помощью маршрутных обследований путем отбора проб объектов природной среды с их последующим анализом (рис. 8). Отбор проб атмосферных выпадений и измерения МАЭД в городах Жиздре, Калуге, Малоярославце, Мосальске, Спас-Деменске и Сухиничи проводились Калужским Центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиалом ФГБУ «Центральное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (Центральное УГМС), в г. Обнинске – Институтом проблем мониторинга окружающей среды в составе ФГБУ «НПО «Тайфун». Радиохимический анализ (содержание ^{90}Sr и изотопов плутония) производился лабораторией института в объединенных за квартал пробах атмосферных аэрозолей, отобранных в г. Обнинске.



Рис. 8. Стационарные посты наблюдения системы радиационного мониторинга Росгидромета на территории Калужской области. **Fig. 8.** Stationary monitoring posts of the Roshydromet radiation monitoring in Kaluga Region

«В 2018 году среднемесячные и среднегодовые значения МАЭД на территории Калужской области не выходили за пределы колебаний глобального гамма-фона и изменялись соответственно от 0.09 до 0.14 мкЗв/ч и от 0.10 до 0.13 мкЗв/ч. Максимальные среднесуточные значения МАЭД находились в пределах от 0.13 до 0.19 мкЗв/ч. Максимум наблюдался в августе отчетного года в г. Калуге» (Доклад о состоянии ..., 2019, стр. 126).

В атмосферных выпадениях в 2018 году из техногенных радионуклидов регистрировался

только ^{137}Cs . Его фоновые выпадения по Калужской области получены в результате анализа проб, объединенных по трем пунктам (гг. Калуга, Малоярославец и Спас-Деменск), расположенным на незагрязненной территории; показатели остались на уровне прошлого года и составили $0.40 \text{ Бк/м}^2\cdot\text{год}$, что в 2.0 раза превышает средневзвешенное годовое значение выпадений ^{137}Cs для незагрязненной в результате аварии на ЧАЭС Европейской территории России – $0.20 \text{ Бк/м}^2\cdot\text{год}$. Повышенные выпадения ^{137}Cs на незагрязненной территории обусловлены ветровым переносом радионуклида с загрязненных территорий области.

На загрязненных территориях и в Обнинске годовые выпадения ^{137}Cs были в разы выше региональных фоновых выпадений. В г. Жиздре, расположенном на загрязненной после Чернобыльской аварии территории, выпадения ^{137}Cs в 2018 году увеличились в 1.2 раза по сравнению с 2017 годом и были в 6.3 раза выше фоновых выпадений по Калужской области. В Обнинске годовые выпадения ^{137}Cs уменьшились и составили $0.9 \text{ Бк/м}^2\cdot\text{год}$, что в 2.3 раза выше фоновых выпадений по области.

Выпадения изотопа ^{90}Sr в пределах г. Обнинска в 2018 году оказались ниже предела обнаружения. Выпадения природного радионуклида ^7Be в отчетном году изменялись в диапазоне $11.00\text{--}74.00 \text{ Бк/м}^2\cdot\text{месяц}$ и составили за год 479.00 Бк/м^2 . Выпадения природного ^{40}K составили 57.80 Бк/м^2 , изменяясь от <1.0 до $7.4 \text{ Бк/м}^2\cdot\text{месяц}$.

Среднегодовая объемная суммарная бета-активность радионуклидов в воздухе г. Обнинск в 2018 году увеличилась в 1.6 раза по сравнению с 2017 г. и составила $29.8\cdot 10^{-5} \text{ Бк/м}^3$ (Доклад о состоянии ..., 2019).

В Обнинске в приземном слое атмосферы регулярно регистрировались техногенные ^{137}Cs , ^{90}Sr , изотопы плутония и радиоактивный ^{131}I . Среднегодовая объемная активность ^{137}Cs в городе в 2018 году возросла в 1.2 раза по сравнению с предыдущим годом и была в 1.3 раза выше уровня средневзвешенного значения для Центра ЕТР за 2018 год. Содержание ^{90}Sr в воздухе в первом полугодии уменьшилось в 1.2 раза в сравнении с аналогичным периодом 2017 года. Объемные активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ с января по август колебались в диапазоне $(1.10\text{--}33.0)\cdot 10^{-9}$ и $(1.00\text{--}8.70)\cdot 10^{-9}$ соответственно.

В 2018 году в приземном слое атмосферы Обнинска было зарегистрировано 130 случаев появления ^{131}I (самое большое количество случаев за все время наблюдения). Среднегодовая объемная активность ^{131}I составляла $8.8\cdot 10^{-4} \text{ Бк/м}^3$, что в 2.0 раза выше, чем в 2017 году, и на 4 порядка ниже ДОА_{НАС}. Регистрация радиоактивного йода в приземном слое атмосферы Обнинска обусловлена местным источником – филиалом Института им. Л.Я. Карпова (Доклад о состоянии ..., 2019).

Из естественных радионуклидов в приземном слое атмосферы г. Обнинск определялись ^7Be , ^{40}K и ^{22}Na . Среднегодовая объемная активность ^7Be в воздухе от года к году менялась в пределах величины одного порядка и в 2018 году составила $306\cdot 10^{-5} \text{ Бк/м}^3$. Объемная активность ^{40}K изменялась в диапазоне $(0.59\text{--}2.10)\cdot 10^{-5} \text{ Бк/м}^3$ со среднегодовым значением $1.09\cdot 10^{-5} \text{ Бк/м}^3$, что выше уровня 2017 года – $0.82\cdot 10^{-5} \text{ Бк/м}^3$. С апреля по сентябрь в пробах аэрозолей регистрировался ^{22}Na с объемной активностью в диапазоне $(0.016\text{--}0.049)\cdot 10^{-5} \text{ Бк/м}^3$.

На территории Калужской области в 2018 году радиационную обстановку можно считать удовлетворительной и стабильной за исключением районов, пострадавших в результате аварии на ЧАЭС. Регистрируемое радиоактивное загрязнение окружающей среды техногенными радионуклидами в ближней 10-км зоне РОО г. Обнинска было значительно ниже существующих нормативов. Однако отдельные РОО области продолжали оказывать влияние на загрязнение атмосферы ^{131}I (отсутствует в глобальном фоне из-за короткого периода жизни – 8.04 сут.) и на повышенное по сравнению с фоновыми уровнями радиоактивное загрязнение атмосферы ^{137}Cs , ^{90}Sr и изотопами плутония.

В 2018 году лабораторно был обследован 41 населенный пункт (14%) и исследовано 476 проб основных дозообразующих продуктов питания. Превышения гигиенических

нормативов установлены в 1 пробе – ягодах черники, собранных вблизи д. Акимовка Жиздринского района. Содержание радионуклидов в почве на территории области, обусловленное глобальными выпадениями продуктов ядерных взрывов прошлых лет, а также аварией на ЧАЭС, находилось в пределах колебаний, характерных для региона. В воде открытых водоемов удельные активности радионуклидов по суммарной α -, β -активности не превышали значений многолетних наблюдений и находились ниже уровня вмешательства для населения (Доклад о состоянии ..., 2019).

При исследовании проб воды из централизованных и нецентрализованных источников водоснабжения превышений содержания радионуклидов в питьевой воде не установлено.

По данным выборочного контроля кормов в зоне радиоактивного следа на территории Калужской области, проведенного ФГБУ «Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии “Калужский”» в 2018 году, на кормовых угодьях общей площадью 6.2 тыс. га в Жиздринском, Ульяновском и Хвастовичском районах, средняя активность проб зеленой массы многолетних трав (20 проб) в зоне контроля составила 11.33 Бк/кг, максимальная – 23.90 Бк/кг (контрольный уровень для зеленой массы – 370 Бк/кг), минимальная – на уровне фона; средняя активность проб сена многолетних трав (436 проб) – 17.36 Бк/кг, максимальная – 148.10 Бк/кг (контрольный уровень для сена – 600 Бк/кг), минимальная – на уровне фона; средняя активность проб сена естественных трав (39 проб) – 40.76 Бк/кг, максимальная – 221.90 Бк/кг, минимальная – на уровне фона. Сверхнормативно загрязненной кормовой продукции в зоне контроля выявлено не было. Всего было отобрано 504 пробы кормовой продукции (Доклад о состоянии ..., 2019).

Общая информация по плотности загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных угодий по состоянию на 01 января 2019 года с учетом естественного распада представлены в таблице 13.

Радиационный мониторинг в Брянской области

На территории Брянской области в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 08.10.2015 № 1074 «Об утверждении перечня населённых пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС» (2015), в границах радиоактивного загрязнения находилось 749 населённых пунктов, расположенных в 21 районе области. Их территории попадали под разный социальный статус: зона отчуждения (4 пункта), зона отселения (26), зона с правом на отселение (191), зона с льготным социально-экономическим статусом (528). Наиболее интенсивному загрязнению в Российской Федерации подверглись юго-западные районы Брянской области, в которых до настоящего времени имеются территории с уровнями загрязнения почвы ^{137}Cs более 40 Ки/км² (Левкина и др., 2019).

Распределение населённых пунктов Брянской области, которые находятся в пределах зон радиоактивного загрязнения из-за аварии на Чернобыльской АЭС, по величине среднегодовой эффективной дозы облучения жителей на 1 января 2018 г., согласно Постановлению Правительства РФ № 1074 (2015), не изменилось по сравнению с 2017 г.

Радиационным мониторингом загрязнённых территорий занималась комплексная группа, в которую входили специалисты Управления Роспотребнадзора по Брянской области и федеральное бюджетное учреждение здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Брянской области», специалисты по оценке радиационной обстановки и других факторов в населённых пунктах Брянской области, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, под руководством заместителя губернатора Брянской области, созданная приказом МЧС России по Брянской области от 18.01.2018 № 28 (Левкина и др., 2019).

По Постановлению правительства РФ № 1074 (2015) специалисты провели расчёт

среднегодовых эффективных эквивалентных доз облучения населения, проживающего в 749 населённых пунктах Брянской области, за 2017 год, загрязнённых в результате аварии на ЧАЭС. По полученным данным, жители 153 пунктов получают среднюю годовую эффективную дозу облучения за счёт чернобыльских радиоактивных выпадений, равную или более 1 мЗв/год, а в сс. Заборье и Яловка Красногорского района эта доза превышает 5 мЗв/год.

Таблица 13. Данные радиологического обследования сельскохозяйственных угодий по плотности загрязнения ^{137}Cs в районах Калужской области по состоянию на 1 января 2019 (Доклад о состоянии ..., 2019, с. 117). **Table 13.** Data from a radiological survey of agricultural land by ^{137}Cs pollution density in the districts of Kaluga Region as of January 1, 2019 (Доклад о состоянии ..., 2019, p. 117).

Показатель	Вид сельхозугодий						Итого
	Пашня	Залежь	Многолетние насаждения	Сеноосы	Пастбища	Естественные угодья	
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Думиничский район</i>							
Площадь обследования	25218	172	36	913	1316	7482	35137
Средневзвешенное значение ^{137}Cs , Ки/км ²	0.24	0.28	0.43	0.45	0.47	0.39	0.29
Площадь (га) с плотностью загрязнения ^{137}Cs , Ки/км ²	не выявлено	4531	0	0	8	229	5056
	<1	20085	172	36	839	895	28966
	1-2	602	0	0	66	105	1007
	2-5	0	0	0	0	87	108
	5-15	0	0	0	0	0	0
	>15	0	0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)	602	0	0	66	192	255	1115
<i>Жиздринский район</i>							
Площадь обследования	31673	0	592	1189	2363	9899	45716
Средневзвешенное значение ^{137}Cs , Ки/км ²	1.28		0.90	1.72	1.79	1.82	1.43
Площадь (га) с плотностью загрязнения ^{137}Cs , Ки/км ²	не выявлено	427		0	0	0	427
	<1	14572		353	543	1199	19641
	1-2	9292		192	271	393	13746
	2-5	7153		47	342	629	11022
	5-15	229		0	33	142	880
	>15	0		0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)	16674		239	646	1164	6925	25648
<i>Кировский район</i>							
Площадь обследования	31434	0	0	1369	652	0	33455
Средневзвешенное значение ^{137}Cs , Ки/км ²	0.12			0.16	0.13		0.12
Площадь (га) с плотностью загрязнения ^{137}Cs , Ки/км ²	не выявлено	15211			324	179	15714
	<1	16055			1045	473	17573
	1-2	168			0	0	168
	2-5				0	0	0

Продолжение таблицы 13.

1	2	3	4	5	6	7	8	
	5-15	0		0	0		0	
	>15	0		0	0		0	
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)		168		0	0		168	
<i>Козельский район</i>								
Площадь обследования		54050	0	895	1544	1081	394	57964
Средневзвешенное значение ¹³⁷ Cs, Ки/км ²		0.21		0.21	0.36	0.31	0.90	0.22
Площадь (га) с плотностью загрязнения ¹³⁷ Cs, Ки/км ²	не выявлено	8947		107	147	94	0	9295
	<1	44244		788	1359	914	286	47591
	1-2	813		0	38	73	49	973
	2-5	46		0	0	0	59	105
	5-15	0		0	0	0	0	0
	>15	0		0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)		859		0	38	73	108	1078
<i>Куйбышевский район</i>								
Площадь обследования		39944	0	5	789	397	12127	53262
Средневзвешенное значение ¹³⁷ Cs, Ки/км ²		0.35		0.39	0.45	0.42	0.53	0.39
Площадь (га) с плотностью загрязнения ¹³⁷ Cs, Ки/км ²	не выявлено	520		0	0	0	299	819
	<1	39361		5	789	397	10316	50868
	1-2	63		0	0	0	1401	1464
	2-5	0		0	0	0	111	111
	5-15	0		0	0	0	0	0
	>15	0		0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)		63		0	0	0	1512	1575
<i>Людиновский район</i>								
Площадь обследования		19086	521	263	1288	426	4311	25895
Средневзвешенное значение ¹³⁷ Cs, Ки/км ²		0.27	0.26	0.26	0.71	0.36	0.47	0.32
Площадь (га) с плотностью загрязнения ¹³⁷ Cs, Ки/км ²	не выявлено	3744	179	29	0	28	109	4089
	<1	15055	317	234	894	398	3841	20739
	1-2	287	25	0	394	0	313	1019
	2-5	0	0	0	0	0	48	48
	5-15	0	0	0	0	0	0	0
	>15	0	0	0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)		287	25	0	394	0	361	1067
<i>Мещовский район</i>								
Площадь обследования		63233	569	75	170	529		64576
Средневзвешенное значение ¹³⁷ Cs, Ки/км ²		0.25	0.21	0.31	0.33	0.34		0.25
Площадь (га) с плотностью загрязнения ¹³⁷ Cs, Ки/км ²	не выявлено	0	0	0	0	0	0	0
	<1	63116	569	75	170	529	0	60316
	1-2	117	0	0	0	0	0	117
	2-5	0	0	0	0	0	0	0
	5-15	0	0	0	0	0	0	0
	>15	0	0	0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)		117	0	0	0	0	0	117

Продолжение таблицы 13.

1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Перемышльский район</i>							
Площадь обследования	36063	360	221	583	595	293	38115
Средневзвешенное значение ^{137}Cs , Ки/км ²	0.15	0.08	0.11	0.75	0.24	0.35	0.17
	не выявлено	12416	317	118	0	0	12851
	<1	23647	43	103	469	595	25150
Площадь (га) с плотностью загрязнения ^{137}Cs , Ки/км ²	1-2	0	0	0	114	0	114
	2-5	0	0	0	0	0	0
	5-15	0	0	0	0	0	0
	>15	0	0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)	0	0	0	114	0	0	114
<i>Ульяновский район</i>							
Площадь обследования	42136	0	13	322	554	13447	56472
Средневзвешенное значение ^{137}Cs , Ки/км ²	1.97		2.19	3.01	4.00	1.95	1.99
Площадь (га) с плотностью загрязнения ^{137}Cs , Ки/км ²	не выявлено	25	0	70	0	422	517
	<1	8612	4	70	53	3673	12412
	1-2	15415	0	0	114	4100	19629
	2-5	17270	9	54	68	4573	21974
	5-15	814	0	128	319	679	1940
	>15	0	0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)	33499		9	182	501	9352	43543
<i>Хвастовичский район</i>							
Площадь обследования	39825	156	15	431	1134	12674	54235
Средневзвешенное значение ^{137}Cs , Ки/км ²	1.32	1.65	3.20	0.89	1.80	1.23	1.31
Площадь (га) с плотностью загрязнения ^{137}Cs , Ки/км ²	не выявлено	97	0	0	30	239	366
	<1	22807	76	0	305	672	31811
	1-2	5993	17	0	86	85	8236
	2-5	10740	63	15	40	218	13110
	5-15	188	0	0	0	129	712
	>15	0	0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)	16921	80	15	126	432	4484	22058
<i>Калужская область</i>							
Площадь обследования	380915	1398	2813	8802	9207	60987	464122
Средневзвешенное значение ^{137}Cs , Ки/км ²	0.62	0.36	0.41	0.73	1.11	1.20	0.71
Площадь (га) с плотностью загрязнения ^{137}Cs , Ки/км ²	не выявлено	49181	544	254	549	560	52445
	<1	262417	749	2296	6687	6285	315067
	1-2	32877	42	192	969	770	46600
	2-5	35209	63	71	436	1002	46478
	5-15	1231	0	0	161	590	3532
	>15	0	0	0	0	0	0
Загрязнено (свыше 1 Ки/км ²)	69317	105	263	1566	2362	22997	96610

На метеостанциях Жуковка и Брянск, которые находятся в 100-км зоне Смоленской АЭС и на метеостанции Красная Гора (зона радиоактивного загрязнения – 5-15 Ки/км²) ежедневно отбираются суточные пробы атмосферных выпадений. По данным НПО «Тайфун»

Росгидромета, уровни загрязнения на этих территориях на 1 января 2018 г. находились в пределах от 0.1 до 160.1 Ки/км². Среднемесячная плотность радиоактивных выпадений находилась в пределах 0.6-0.8 Бк/м² на метеостанции Жуковка, 0.6-0.9 Бк/м² на метеостанции Красная Гора, 0.6-0.8 Бк/м² на метеостанции Брянск. Высоких и экстремально высоких (>110 Бк/м²) значений суточных выпадений обнаружено не было (Левкина и др., 2019).

В августе 2018 г. проводились обследования по маршруту № 1, где в 4 населенных пунктах (Ущерпье и Мартьяновка Клинцовского района; п.г.т. Красная Гора Красногорского района; Творишино Гордеевского района) пострадавших в результате аварии на ЧАЭС, измерялась мощность экспозиционной дозы гамма-излучения в реперных точках. Значения мощности эквивалентной дозы (МЭД), измеренные в 2018 г. в реперных точках маршрута № 1, представлены в таблице 14.

Таблица 14. Значения мощности эквивалентной дозы в реперных точках (Росгидромет; Левкина и др., 2019, с. 112). **Table 14.** Equivalent dose rate values at the reference points (Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia; Левкина и др., 2019, p. 112).

Зона загрязнения (Ки/км ²)	Населенный пункт	Значения мощности эквивалентной дозы (мкР/час)		
		Репер 1	Репер 2	Репер 3
1-5	Мартьяновка	13	13	15
5-15	Красная Гора	15	16	15
	Творишино	24	23	24
15-40	Ущерпье	34	28	25

«С учётом данных отчётов государственного федерального статистического наблюдения в Единой государственной системе контроля и учёта доз облучения граждан составлен радиационно-гигиенический паспорт территории Брянской области, который позволил оценить основные показатели радиационной безопасности и воздействие радиационного фактора на жителей. Для оценки доз внешнего облучения населения проводились измерения МЭД гамма-излучения (естественного гамма-фона) в реперных точках Брянской области (с привязкой к географической системе координат), расположенных в г. Брянск, г. Дятьково, г. Злынка, г. Жуковка, г. Почеп, г. Карачев, г. Новозыбков, п.г.т. Красная Гора, п.г.т. Климово, п. Гордеевка, п. Комаричи и на территориях населённых пунктов, обследованных в рамках радиационно-гигиенического мониторинга. В 2018 году было проведено 5232 измерения МЭД гамма-излучения (гамма-фона). В 331 измерении МЭД гамма-излучения на территориях юго-западных районов (Злынковского, Гордеевского, Красногорского, Новозыбковского) Брянской области, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС, установлено превышение более 0.30 мкЗв/ч. Согласно результатам дозиметрических измерений в 2018 году наибольшие уровни гамма-фона отмечаются на открытой местности в н.п.: Заборье Красногорского района (0.79 мкЗв/час); Вышков Злынковского района (0.63 мкЗв/час); Рудня-Воробьевка Гордеевского района (0.66 мкЗв/час); Старый Вышков Новозыбковского района (0.59 мкЗв/час), Унеча (0.36 мкЗв/час) и Веприн Клинцовского района (0.36 мкЗв/час)» (Левкина и др., 2019, стр. 112).

Структура доз облучения жителей в Брянской области. Структура коллективной дозы населения Брянской области и ее юго-западных районов, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС, за период с 2015 по 2017 гг. представлена в таблице 15.

Согласно имеющимся данным по Брянской области за 2017 год (Левкина и др., 2019), вклад в эффективную коллективную дозу облучения населения области от всех видов

источников ионизирующего излучения составляет (табл. 16):

- 0.02% (0.77 человек-зиверт в год (чел.-Зв/год) от техногенных источников (для персонала);
- 7.25% (269.55 чел.-Зв/год) от техногенно-изменённого радиационного фона радиационных аварий (на ЧАЭС);
- 13.67% (509.25 чел.-Зв/год) от медицинских исследований;
- 79.06% (2945.10 чел.-Зв/год) от природных источников излучения.

Таблица 15. Структура годовой эффективной коллективной дозы облучения населения, чел.-Зв/год (Левкина и др., 2019, стр. 114). **Table 15.** The structure of the annual effective collective dose of the population, individual-Sv/year (Левкина и др., 2019, p. 114).

Территория	Годы	Природные источники			Техногенный фон		
		2015	2016	2017	2015	2016	2017
Брянская область		3106.07	2950.11	2945.10	340.76	269.86	269.55
Юго-западные районы		470.90	420.43	417.43	240.32	234.37	225.10
РФ		485499.0	479613.0	486310.0	1296.0	1243.0	1350.0
Территория	Годы	Медицинские источники			Предприятия с ИИИ*		
		2015	2016	2017	2015	2016	2017
Брянская область		516.68	573.55	509.25	0.66	0.65	0.77
Юго-западные районы		40.94	54.61	47.78	0.055	0.05	0.06
РФ		71768.0	71029.0	80270.0	293.0	301.0	292.0

Примечания к таблице 15-17: *ИИИ – ионизирующие источники излучения.

Таблица 16. Вклад различных источников в дозы облучения населения, % (Левкина и др., 2019, стр. 114). **Table 16.** Contribution of various sources to the dose of the population, % (Левкина и др., 2019, p. 114).

Территория	Природные источники			Техногенный фон			Медицинские источники			Предприятия с ИИИ		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Брянская область	78.35	77.75	79.06	8.60	7.11	7.25	13.03	15.12	13.67	0.02	0.02	0.02
Юго-западные районы	62.61	59.26	60.46	31.95	33.03	32.61	5.44	7.69	6.92	0.02	0.02	0.01
РФ	86.87	86.08	85.58	0.23	0.24	0.24	12.84	13.63	14.13	0.06	0.05	0.05

Средние индивидуальные дозы облучения населения Брянской области от источников ионизирующего излучения за период 2015-2017 гг. в расчёте на 1 жителя представлены в таблице 17.

В радиационно-гигиеническом паспорте области по состоянию на 2017 год средняя дозовая нагрузка на 1 жителя от различных источников ионизирующего излучения составила 3.08 мЗв/год (на 1 жителя РФ – 3.87 мЗв/год). В том числе за счёт природных источников

излучения – 2.43 мЗв/год, медицинских рентгенорадиологических исследований – 0.42 мЗв/год, аварии на ЧАЭС – 0.22 мЗв/год, деятельности предприятий, использующих ионизирующие источники излучения, – 0.001 мЗв/год (Левкина и др., 2019).

Таблица 17. Средние индивидуальные дозы облучения населения от источников ионизирующего излучения в расчёте на одного жителя, мЗв/год (Левкина и др., 2019, стр. 115). **Table 17.** Average individual doses to the population from ionizing radiation sources per inhabitant, mSv/year (Левкина и др., 2019, p. 115).

Терри- тория	Природные источники			Техногенный фон			Медицинские источники			Предприятия с ИИИ		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Брянская область	2.534	2.416	2.432	0.278	0.221	0.218	0.421	0.470	0.420	0.001	0.001	0.001
Юго- западные районы	2.333	2.089	2.091	1.190	1.165	1.128	0.202	0.271	0.239	–	–	–
РФ	3.310	3.237	3.31	0.009	0.009	0.009	0.489	0.513	0.546	0.0020	0.0019	0.002

Из анализа трёхлетнего наблюдения (2015-2017 гг.) за индивидуальными дозами облучения жителей Брянской области можно сделать вывод, что радиационная обстановка на территории остается стабильной. Доза облучения жителя в 2017 году за счёт техногенного фона составляет 0.218 мЗв/год и существенно превышает данный общероссийский показатель – 0.009 мЗв/год, за счёт природных источников – 2.43 мЗв/год, что в 1.36 раза меньше общероссийского показателя – 3.31 мЗв/год.

Для оценки вклада внешнего облучения в суммарную годовую дозу были выбраны населённые пункты Брянской области, находящиеся в границах различных зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС и утверждённые Постановлением Правительства Российской Федерации от 08.10.2015 № 1074 (2015). Зона отселения: Новое, Новые Бобовичи; зона с правом на отселение: Гордеевка, Творишино, Михайловка, Черный Ручей, Каташин, Красная Гора, Шеломы, Старые Бобовичи, Клиницы, Новозыбков; зона с льготным социально-экономическим статусом: Лопатни, Кибирщина, Ларневск, Лотаки, Любовшо, Старый Кривец (табл. 18).

Для учёта степени экранирования гамма-излучения, обусловленной проживанием населения в разных типах домов, что влияет на величину годовой дозы, формируемой внешними источниками излучения, термолюминесцентные дозиметры в населённых пунктах выдавались с учётом данного фактора. Индивидуальные дозиметры были выданы жителям, проживающих в домах разного типа: в деревянных – 146 человек, кирпичных (панельных) – 229, из дерева/кирпича – 15 (Левкина и др., 2019).

Среди различных профессиональных и социально-демографических групп населения термолюминесцентные дозиметры были выданы рабочим и работникам сельского хозяйства – 129, служащим – 151, пенсионерам – 66, учащимся и студентам – 6, домохозяйкам, безработным и т.д. – 38.

Максимальная индивидуальная доза за период ношения термолюминесцентного дозиметра составила 0.021 мЗв (СГЭД – 0.25 мЗв/год) и была зафиксирована у участкового уполномоченного НП Новые Бобовичи, что объясняется самой высокой плотностью загрязнения данного места – 14.6 Ки/км² из всего числа подвергнутых индивидуальному дозиметрическому контролю, а также профессиональной деятельностью служащего. По предварительной оценке результатов индивидуального дозиметрического контроля

жителей 16 населённых пунктов Гордеевского, Клинцовского, Красногорского, Новозыбковского районов и гг. Клинцы и Новозыбков, годовая эффективная доза от внешнего облучения жителя более 1 мЗв/год не установлена (Левкина и др., 2019).

Таблица 18. Результаты контроля индивидуальных доз внешнего облучения жителей населённых пунктов (без вклада природных источников; Левкина и др., 2019, с. 116).

Table 18. The results of the control of individual doses of external exposure to residents of settlements (without the contribution of natural sources; Левкина и др., 2019, p. 116).

№ п/п	Администрация (поселение)	Наименование населённого пункта	Плотность загрязнения ^{137}Cs , Ки/км ²	Количество населения	Средняя доза жителей в НП за период ношения, мЗв	Макс. СГЭД ₉₀ , мЗв
Гордеевский район						
1	Гордеевское	Гордеевка	12.2	20	0.015	0.019
2	Творишенское	Черный Ручей	4.9	16	0.006	0.013
3	Творишенское	Михайловка	9.6	8	0.012	0.018
4		Творишино	10.3	16	0.012	0.017
Красногорский район						
5	Красногорское	Красная Гора	4.0	16	0.007	0.009
6	Любовшанское	Любовшо	2.8	1	0.006	0.006
7	Лотаковское	Кибирщина	3.4	1	0.005	0.005
8	Лотаковское	Ларневск	3.0	1	0.004	0.004
9		Лотаки	3.2	1	0.003	0.003
Клинцовский район						
10	Лопатенское	Лопатни	3.2	30	0.005	0.008
11		г. Клинцы	4.2	37	0.005	0.008
Новозыбковский район						
12	Старокривецкое	Каташин	5.3	25	0.006	0.010
13		Старый Кривец	3.7	25	0.004	0.006
14	Шеломовское	Новое Место	13.7	11	0.013	0.019
15		Шеломы	11.2	44	0.012	0.017
16	Старо-бобовичское	Новые Бобович	14.6	26	0.015	0.021
17		Старые Бобович	13.2	34	0.013	0.019
18		г. Новозыбков	9.8	78	0.009	0.014

Радиационный контроль пищевых продуктов. Показателями радиационной безопасности продуктов питания и продовольственного сырья в соответствии с действующими гигиеническими нормативами являются два техногенных радионуклида – ^{137}Cs и ^{90}Sr . В 2018 году по Брянской области было исследовано 4118 проб продовольственного сырья и пищевых продуктов на определение содержания этих радионуклидов. При осуществлении радиационно-гигиенического мониторинга пищевых продуктов из населённых пунктов, отнесённых к зонам радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС установлено, что превышение нормативов выявлено только для ^{137}Cs . Удельный вес количества проб с превышением нормативов ежегодно снижается и в 2018 году составил 3.6%,

что на 1.0% ниже, чем в 2017 году, и на 1.5% ниже, чем в 2016 году. Количество населённых пунктов, где выявлялись пробы местных продуктов питания с превышением гигиенических нормативов, в 2018 году сократилось до 70 (2017 г. – 88, 2016 г. – 93; Левкина и др., 2019).

Ежегодное снижение количества исследованных проб по области в целях мониторинга на 15-16% обусловлено неинформативными результатами (ниже предела измерения спектрометрического оборудования). В том числе из наиболее загрязнённых юго-западных районов области исследовано 1690 проб (2017 г. – 1858, 2016 г. – 2073), что также ежегодно сокращается на 9-10% в основном за счёт проб молока (так как сократилось количество коров в личном подсобном хозяйстве) и овощей (с результатами на уровне чувствительности спектрометров).

По юго-западным районам области также заметна тенденция по снижению удельного веса неудовлетворительных проб, который в 2018 году составил 8.9%, что на 2.9% (в 1.3 раза) ниже, чем в 2017 году, и на 3.5% (в 1.4 раза) ниже, чем в 2016 году.

Основной объём продукции, не отвечающей гигиеническим нормативам, регистрируется в группе грибов и лесных ягод. Норматив по содержанию ^{137}Cs в грибах – 500 Бк/кг, в сухих грибах – 2500 Бк/кг, в лесных ягодах – 160 Бк/кг. Максимальные уровни содержания ^{137}Cs зарегистрированы в грибах Новозыбковского района – 11100 Бк/кг, в сухих грибах Злынковского района – 29820 Бк/кг, в лесных ягодах (чернике) Климовского района – 2315 Бк/кг (Левкина и др., 2019).

В 2018 году зарегистрировано превышение допустимых уровней в 6 пробах молока из личного подсобного хозяйства. За период 2016-2018 гг. ежегодно сокращается количество неудовлетворительных проб молока, а также их удельный вес от общего количества неудовлетворительных проб – с 6.6% в 2016 году до 4.0% в 2018 году.

Среднее значение удельной активности ^{137}Cs в молоке из личного подсобного хозяйства осталось практически на уровне прошлого года как в целом по области, так и по ее юго-западным районам, и составило 14.5 и 16.1 Бк/л, соответственно. Максимальная удельная активность ^{137}Cs в образцах молока юго-западных районов составила 161.4 Бк/л в 2018 году, 242.0 Бк/л в 2017 году.

Радиационный контроль питьевой воды. Контроль качества воды на радиационную безопасность проводился по определению показателей безопасности (удельной суммарной альфа- и бета-активности и содержанию отдельных радионуклидов) на соответствие требований гигиенических нормативов. В 2018 году было изучено 1112 проб, проведено 3299 исследований. Радиохимические исследования по определению отдельных радионуклидов проводились только по результатам предварительной оценки качества воды в случаях несоответствия гигиеническим нормативам по суммарной альфа- и бета-активности и в целях социально-гигиенического мониторинга.

Зарегистрированы случаи превышения контрольных уровней первичной оценки питьевой воды. Доля проб из источников централизованного водоснабжения, превышающих контрольные уровни по суммарной альфа-активности (0.2 Бк/кг), составила 8.0% в 2016 г., 5.5% в 2017 г., 7.4% в 2018 г. (Левкина и др., 2019).

Несоответствия по суммарной альфа-активности выявлялись в подземных источниках централизованного водоснабжения г. Брянска, а также Брянского, Выгоничского, Дятьковского, Карачевского, Навлинского, Брасовского, Комаричского, Трубчевского, Жуковского и Почепского районов Брянской области.

Среднее значение содержания суммарной альфа-активности в пробах питьевой воды за период 2016-2018 гг. на территории области находится в пределах 0.08-0.11 Бк/кг, максимальное – 0.38-0.39 Бк/кг. По содержанию удельной суммарной бета-активности исследованные образцы питьевой воды соответствовали требованию гигиенического норматива – 1.0 Бк/кг. Среднее значение суммарной бета-активности находится в пределах

0.30-0.34 Бк/кг, максимальное – 0.59-0.82 Бк/кг. Среднее значение содержания ^{222}Rn находится ниже уровня минимальной детектируемой активности спектрометрического оборудования – 8.0 Бк/кг. Максимальное содержание ^{222}Rn – 33.1 Бк/кг (Левкина и др., 2019).

В рамках социально-гигиенического мониторинга проводились исследования проб из поверхностных водоёмов на содержание отдельных радионуклидов. Число исследованных проб по суммарной альфа- и бета-активности составило 42 в 2016 г., 47 в 2017 г., 41 в 2018 г. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr и естественных радионуклидов значительно ниже уровней вмешательства для питьевой воды (Левкина и др., 2019).

Радиационный контроль почв сельскохозяйственных угодий. Мониторинг радиационной обстановки на почвах сельскохозяйственных угодий показал наличие 355.5 тыс. га, относящихся к разряду загрязнённых (свыше 37 кБк/м²), в т.ч. 233.0 тыс. га приходится на пашни и 122.5 тыс. га на кормовые угодья. Имеются территории, где почвы нуждаются в защитных реабилитационных мероприятиях (плотность загрязнения выше 185 кБк/м²), они занимают 121.1 тыс. га, что составляет 7.3% от всех сельскохозяйственных угодий области: 63.4 тыс. га – пашни, 57.7 тыс. га – кормовые угодья.

Практически все угодья свыше 185 кБк/м² находятся в юго-западных районах, которые с 1986 года значатся как наиболее пострадавшие в результате аварии на ЧАЭС. Анализ полученных результатов радиологического обследования показывает, что очищение почв (переход) из разряда загрязнённых (свыше 37 кБк/м²) в «чистые» (до 37 кБк/м²) составляет всего 254.1 тыс. га (18.7%), в т.ч. 101.4 тыс. га (22.0%) по юго-западным районам (Левкина и др., 2019).

Изменение средневзвешенного показателя плотности загрязнения почв говорит о том, что радиационная ситуация в целом стабилизируется, т.е. снижение уровня загрязнения наблюдается в основном за счет естественного распада и в малой мере за счет вертикальной и горизонтальной миграции. Исследования показали, что уровень гамма-фона сильно варьирует по районам Брянской области – от 9.0 мкР/ч в Суражском районе до 21.3 мкР/ч в Гордеевском, Климовском, Новозыбковском районах. Гамма-фон на территории всех районов Брянской области не превышает допустимой нормы.

Наиболее высокий уровень содержания ^{137}Cs в почве (плотность загрязнения) зафиксирован в Новозыбковском районе – 344.3 кБк/м² (Левкина и др., 2019).

Методика оценки защищенности и уязвимости подземных вод к загрязнению

К настоящему времени отечественные и зарубежные специалисты разработали целый ряд весьма отличных друг от друга методик оценки условий защищенности подземных вод от загрязнения и тесно связанных с ними схем составления соответствующих карт. Эти методики, в большинстве своем имеющие прикладной характер, позволяют иногда достаточно успешно решать некоторые конкретные задачи, но в то же время не могут быть признаны вполне удовлетворительными и универсальными.

После аварии на ЧАЭС одним из авторов разработана оригинальная авторская методика для оценки и картирования защищенности и уязвимости подземных вод от загрязнения различными веществами, включая радионуклиды. Она была опробованная на различных объектах и опубликована в работах А.П. Белоусовой с соавторами (Белоусова, 2001, 2005, 2012; Белоусова, Галактионова, 1994; Белоусова и др., 2006, 2019). Таким образом, при оценке загрязнения и уязвимости грунтовых вод к загрязнению радионуклидами на территории Калужской области, пострадавшей от аварии на ЧАЭС, используется разработанная нами методика, которая позволяет оценивать защищенность вод количественными методами, путем определения времени миграции любого загрязняющего вещества через защитную зону в подземные (грунтовые) воды, что позволяет давать

предварительные прогнозные оценки развития процессов загрязнения подземных вод.

Характеристика объекта исследований

Географическое положение. Объектом исследования является часть территории Калужской области, пострадавшая от аварии на Чернобыльской атомной станции (находится в зоне радиоактивного следа). Границы этой территории с учетом удобства задания граничных условий при моделировании установлены по речной сети: по рекам Болва – Овсорок – Огарь (на западе и юго-западе территории); по р. Рессета (на юге и юго-востоке); по рр. Жиздра и Драгожань (на северо-востоке) и р. Перетесна (на севере). Часть западной и южной границы объекта совпадает с административной границей области (рис. 9).

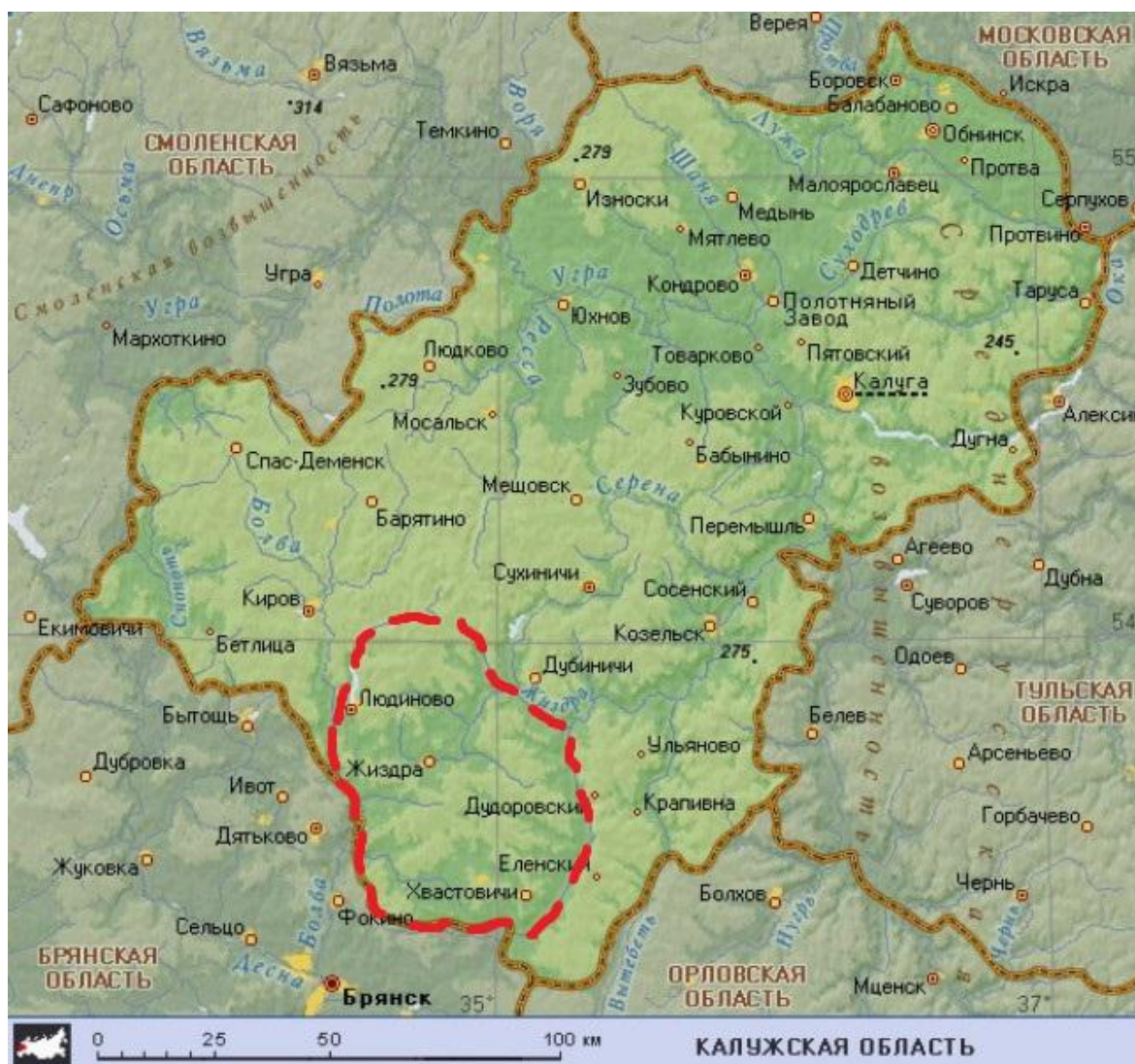


Рис. 9. Физическая карта Калужской области (красным контуром обозначен объект оценки).

Fig. 9. Physical map of Kaluga Region (red marks the object of our assessment).

Гидрогеологические условия. Характеристика составлена по материалам опубликованных работ гидрогеологического обследования масштабom 1:500000 (Мельникова и др., 1982; Объяснительная записка ..., 1979), материалам гидрогеологических съемок масштабom

1:200000 (Малюгина, Кулешова, 1981) с использованием отчета Института водных проблем АН СССР (Зекцер, Белоусова, 1990).

«Водоносный горизонт современных аллювиальных отложений ($a1Q_{IV}$) развит по всем речным долинам, крупным балкам и оврагам в отложениях надпойменных и пойменных террас и русел. Водосодержащие пески в верхней части разреза чаще мелкозернистые, книзу, как правило, с включениями гравия, гальки и щебенки, иногда в подошве залегает прослой гравия и галечника. Пески чередуются с невыдержанными по простираению маломощными прослоями и линзами глин, суглинков и супесей. Мощность водосодержащей толщи колеблется от 1-2 м в балках и оврагах до 6 м (реже до 10) по долинам мелких рек и до 10-20 м в долине Оки. Водоносные пески не имеют выдержанного водоупорного ложа и залегают на различных стратиграфических горизонтах четвертичных и дочетвертичных отложений. Так, в долине р. Оки – нижнемеловые и юрские глины, а также суглинки днепровской морены. Водоупорного перекрытия воды современных аллювиальных отложений обычно не имеют и являются типичными грунтовыми водами. Воды вскрываются большей частью на глубине 1-3 м, а в долинах небольших рек – до 1.5 м; в прибрежных частях пойм крупных рек (Оки). Положение зеркала грунтовых вод тесно связано с уровнем воды в реке. Поток грунтовых вод обычно направлен к руслу, величина уклона незначительна. Воды современных аллювиальных отложений весьма различны по качеству, но преимущественно они мягкие, пресные; преобладают гидрокарбонатные кальциевые воды, сравнительно часто встречаются и магниевые.

Водоносный комплекс древнеаллювиальных отложений ($a1Q_{II-III}$). Воды (объединенных) древнеаллювиальных отложений приурочены к песчаным толщам высоких надпойменных террас, протягивающихся вдоль крупных рек и их наиболее крупных притоков. Особенно широко они развиты по левобережью р. Оки, где прослеживается четыре надпойменных террасы. Водовмещающими породами древнеаллювиальных отложений являются пески с прослоями супесей, суглинков и глин. Пески обычно мелко- и среднезернистые; к подошве слоя пески разнозернистые, иногда они переходят в гравийно-галечные слои. Общая мощность отложений в сводном разрезе колеблется от 15 до 55 м. Мощность обводненной толщи песков древнего аллювия составляет от 1.2 до 1.5 м. водоносный комплекс всюду является первым от дневной поверхности и водоупорного перекрытия, как правило, не имеет. Водоупорным ложем являются иловатые аллювиальные глины того же возраста или моренные суглинки. Воды древнеаллювиальных отложений большей частью залегают на глубине 0-4 м, а в областях развития покровных суглинков на глубине 20-16 м. Воды древнеаллювиальных отложений характеризуются слабой минерализацией, они преимущественно гидрокарбонатного, реже сульфатно-гидрокарбонатного кальциевого типа. Общая минерализация их не превышает 0.7 г/л, изредка достигая 1 г/л, обычно изменяется в пределах от 0.1 до 0.4 г/л. Питание комплекса происходит как за счет атмосферных осадков, так и за счет подтока вод из дочетвертичных пород девона, карбона, мела.

Валдайско-московский водоносный горизонт водно-ледниковых отложений ($fgl, lgl Q_{III-IV}$) приурочен к валдайско-московским межморенным и московским надморенным флювиогляциальным и озерно-ледниковым отложениям. Не большей площади к западу и северо-западу от Калуги и до границы валдайского оледенения широко распространены флювиогляциальные и озерно-ледниковые отложения, залегающие на московской морене. Они не имеют водоупорного перекрытия, и приуроченные к ним воды являются грунтовыми. Водовмещающими породами здесь служат разнозернистые пески – от тонкозернистых, даже пылеватых, до грубозернистых и гравийных песков с прослоями галечников и валунов. Мощность толщи непостоянна и обычно изменяется от 3-4 до 10-12 м, изредка достигая 20-45 м. Глубина залегания зеркала грунтовых вод изменяется в различные сезоны года, т.к. зависит от количества атмосферных осадков. Тип воды преимущественно гидрокарбонатный

магниево-кальциевый или сульфатно-гидрокарбонатный кальциево-магниевый.

Воды спорадического распространения московской морены ($glQ_{II}m$). В большей части морена представлена плотными валунными суглинками и служит водоупором для выше- и нижележащих водоносных горизонтов. Воды приурочены к песчаным линзам, гнездам и прослоям песков и супесей, залегающих среди суглинков, реже они содержатся в отторженцах⁵ коренных пород. Пески преимущественно мелко- и среднезернистые с гравием и галькой, линзы и прослои песков не выдержаны как по мощности, так и по простиранию. Воды, приуроченные к линзам и прослоям песка, нередко являются напорными, величина напора составляет от 1-2 до 7-10 м. Состав воды преимущественно гидрокарбонатный, реже сульфатно-гидрокарбонатный, по составу катионов магниево-кальциевый и натриево-кальциевый. Питание подземных вод морены происходит путем инфильтрации атмосферных осадков на участках, где песчаные линзы сообщаются с дневной поверхностью или залегают вблизи нее.

Московско-днепровский водоносный горизонт водно-ледниковых отложений ($fgl, lgQ_{dn}m$) приурочен к московско-днепровский межморенным и днепровским недморенным флювиогляциальным и озерно-ледниковым отложениям. Подземные воды, связанные с этими отложениями, образуют единый водоносный горизонт – напорный – в области развития московского оледенения или грунтовый, безнапорный – вне области московского оледенения, преимущественно на водораздельных участках (бассейн Оки, Жиздры). Воды приурочены к толще разнозернистых песков с гравием и галькой, иногда с гравийными прослоями, с подчиненными прослоями суглинков и глин. Общая мощность песков весьма изменчива, чаще она составляет 10-12 м, изредка увеличивается до 25-36 м или сокращается до 1-2 м, иногда пески замещаются суглинками. Глубина залегания кровли водоносного горизонта колеблется от 2-3 до 20-30 м, редко более. Глубина залегания уровня воды изменяется обычно от 3 до 5-7 м. Московско-днепровский водоносный горизонт питается главным образом атмосферными осадками, а также подтоком вод из выше- и нижележащих водоносных горизонтов. Общая минерализация воды горизонта изменяется от 0.04 до 0.6 г/л, чаще 0.1-0.4 г/л и лишь иногда повышается до 0.7-0.8 г/л.

Воды спорадического распространения днепровской морены ($glQ_{I}dn$). Морена днепровского оледенения развита почти повсеместно. Она сложена плотными неоднородными суглинками, реже супесями с гравием, галькой и валунами, с редкими прослоями, линзами и гнездами песков и отторженцев коренных пород. Мощность морены обычно составляет 10-15 м, увеличиваясь в погребенных долинах. Плотные валунные суглинки днепровской морены в основном, являются водоупором, отделяющим вышеописанный московско-днепровский горизонт от нижележащих водоносных горизонтов. Днепровская морена залегает на днепровско-окских и подоокских песках и на дочетвертичных порогах. Подземные воды содержатся в опесчаненных разностях моренных суглинков, в линзах, гнездах и прослоях песков и супесей, мощность которых обычно от 0.2 до 2 м, редко 5-8 м и более; они встречается также в отторженцах дочетвертичных пород, заключенных в толще валунных суглинков. Пески преимущественно мелко- и среднезернистые с гравием и галькой. Условия залегания, режим, притоки и качество воды днепровской морены, аналогичны водам московской морены. Общая минерализация воды составляет обычно от 0.1 до 0.8 г/л, общая жесткость от 0.7 до 9.6 мг-экв/л. Внутриморенные воды питаются путем инфильтрации атмосферных осадков, а также, по-видимому, за счет подтока вод из выше- и нижележащих водоносных горизонтов.

Верхнечетвертичный аллювиальный водоносный горизонт (aQ_{III}) приурочен

⁵ Отторженец – глыба горных пород, размером от нескольких метров до сотен метров, перенесенная ледником на расстояние до нескольких сотен километров.

к отложениям первой и второй надпойменных террас. Водовмещающие породы – разномерные пески, в основном мелкозернистые, иногда глинистые, с прослоями супесей. Мощность обводненной толщи колеблется от долей метра до 13 м. Уровень грунтовых вод залегает на глубине от 0.5 до 5 м (123-217 м н.у.м. БС). Горизонт подстилают обводненные и водоупорные отложения четвертичного, мезозойского и каменноугольного возраста. Водообильность горизонта незначительная. Воды преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.2-0.9 г/л, с общей жесткостью 2.4-9.4 мг-экв/л. Реакция воды слабокислая и щелочная (рН=5.6-7.2).

Верхнемосковский конечно-моренный водоносный горизонт (glQ_{IIms_3}) развит на обширных участках распространения крупных гряд – Спас-Деменской, Занозненско-Ерзуковской. Водоносны разномерные пески с большим содержанием гравия, гальки и валунов (30-50%), с прослоями суглинков. Мощность обводненной толщи изменяется от 5 до 20, преобладает 5- 10 м. Зеркало воды залегает на глубине до 15 м, на абсолютных высотах от 134 до 260 м. Водообильность описываемых отложений невысокая. Водосодержащие породы характеризуются коэффициентом фильтрации от 1.54 до 4.75 м/сутки. Воды гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.2- 0.5 г/л, общей жесткостью 4.1-8.3 мг-экв./л, величиной рН – 7.1-8.2. Питание водоносного горизонта происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Верхнемосковская ледниковая спорадически обводненная толща (gQ_{IIms_3}) содержит воду в линзах, гнездах и невыдержанных прослоях песков и супесей среди валунных суглинков. Распространена она в северной половине территории. Обводненные участки морены мощностью от долей метра до 4 м залегают до глубины 17 м. Воды гидрокарбонатные кальциевые и гидрокарбонатно-хлоридные кальциевые с минерализацией 0.5-1.4, преимущественно 0.5-0.6 г/л, с общей жесткостью 3.08-19.75 мг-экв/л и величиной рН – 7.0-7.3. Воды морены получают инфильтрационное питание.

Нижне-верхнемосковский водно-ледниковый водоносный горизонт ($f, lgQ_{IIms_{1-3}}$) приурочен к аллювиальным и водно-ледниковым отложениям, водоносны пески разномерные, иногда средне- и мелкозернистые (более грубозернистые с гравием в пределах древних долин), с линзами и прослоями суглинков и алевритистых глин. Мощность обводненной толщи изменяется от долей метра на водоразделах до 32 м в древних долинах. Глубина залегания кровли горизонта изменяется от долей метра до 25 м, абсолютные высоты ее снижаются от 237 на водоразделах до 166 м в долинах рек. Уровень воды устанавливается на глубине до 24 м, 173-241 м н.у.м. БС. Воды преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.3-0.5, реже до 1.1 г/л, с общей жесткостью 3.44-15.51 мг-экв/л, величиной рН – 6.4-7.5. Водоносный горизонт питается за счет инфильтрации атмосферных осадков и подтока вод из выше- и нижележащих водоносных горизонтов.

Воды спорадического распространения в нижнемосковской морене (gQ_{IIms_1}) развитой в северной половине территории и в целом являющейся относительным водоупором, приурочены к песчаным разностям суглинков, к линзам, гнездам и прослоям песков мощностью до 18 м. Общая мощность морены равна 29 м. Воды в основном гидрокарбонатные натриево-кальциевые, с минерализацией 0.3-0.4 г/л, общей жесткостью 3.6-7.12 мг-экв/л и величиной рН – 6.8. Питание водоносных линз морены происходит за счет перетока вод из верхне- и нижнемосковского водоносного горизонта, реже из обводненных линз верхнемосковской морены, а в пределах погребенных долин за счет подтока вод из нижележащих отложений.

Днепровско-окский аллювиально-флювиогляциальный водоносный горизонт ($a, fQ_{I-II ok-dn}$) развит в пределах наиболее глубоких погребенных четвертичных долин и древних впадин и приурочен к флювиогляциальным, аллювиальным и озерно-болотным отложениям, залегающим под мореной днепровского оледенения. Водовмещающие породы

преимущественно представлены песками разномерными, иногда глинистыми, с гравием и галькой (с коэффициентом фильтрации от 0.1 до 1.2 м/сутки), реже алевритами с прослоями глин. Мощность горизонта колеблется от долей метра до 36 м, чаще до 20 м. Глубина залегания кровли горизонта изменяется от 6 до 65 м, абсолютные высоты ее составляют от 93 до 195 м. Глубина залегания уровня воды изменяется от 0.7 до 18.0 м, абсолютные высоты его составляют 220-118 м. Воды преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.2-0.4 г/л, общей жесткостью 3.4-7.2 мг-экв/л и щелочной средой.

Сантон-туронский водоносный комплекс (K_{2t-st}) развит на участках высоких водоразделов. Водовмещающие породы, приуроченные к низам нерасчлененных турон-сантонских отложений, представлены трещиноватыми опоками, трепелами, с прослоями глин, мелом, мергелями, алевритами. Обводненная мощность горизонта не превышает 20 м. Глубина залегания кровли горизонта изменяется от долей метра до 25 м, абсолютные высоты кровли составляют 255-220 м. В кровле горизонта залегают водоупорные суглинки днепровской и московской морен, иногда обводненные ниже- и верхнемосковские пески, в подошве – обводненные сеноман-альбские пески, редко тарусско-окские известняки, с водами которых он гидравлически связан. Воды гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.2-0.7 г/л, с общей жесткостью 2.98-12.18 мг-экв/л и величиной рН – 5.7-7.6. Питание водоносного горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузке – в эрозионных врезках.

Сеноман-альбский водоносный горизонт (Kal-st) развит на высоких водораздельных участках в южной части территории и почти всюду является первым от поверхности. Выходы на дневную поверхность отмечаются по рекам Серене, Ужетке (приток Рессы) и левым притоком Брыни. Водовмещающие альб-сеноманские тонко- и мелкозернистые кварцево-глауконитовые пески с конкрециями фосфоритов и прослоями глин имеют мощность от долей метра до 20 м, их коэффициент фильтрации колеблется от 0.05 до 10.4, чаще составляя 0.05-1.8 м/сутки. Глубина залегания кровли горизонта изменяется от 0-2 в долинах рек до 28 м на водоразделах, абсолютные высоты ее колеблются от 196 до 223 м. Максимальная глубина залегания уровня воды – 34, чаще 8-10 м. В местах размыва меловых отложений четвертичными долинами появляется напор до 13 м. Абсолютные высоты уровня горизонта от 192 до 232 м. Воды горизонта преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.2-0.8 г/л, общей жесткостью 2.3-12.8, чаще 2.3-7.0 мг-экв/л и щелочной средой. Питание горизонта осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков через толщу моренных суглинков.

Апт-неокомский водоносный горизонт (K_{1nc-ap}) имеет прерывистое распространение и залегает преимущественно на водораздельных пространствах. В большинстве случаев он является первым от поверхности водоносным горизонтом и вскрывается долинами Серены и Птары. Водовмещающие породы представлены песчано-глинистой толщей неокома и апта, мощностью от долей метра до 23 м. Пески тонко- и мелкозернистые, иногда глинистые и пылеватые, местами сцементированные до песчаников, глины (в основном готерив-барремские) песчаные к алевритистые. Коэффициент фильтрации песков колеблется от 0.01 до 13.0, чаще 0.01-2.4 м/сутки. Глубина залегания кровли горизонта изменяется от 0-2 в долинах рек до 41 м на водоразделах, абсолютные высоты ее от 169 до 214 м. Воды горизонта преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией от 0.2 до 0.8 г/л, общей жесткостью 5.9-12.8 мг-экв/л и щелочной средой. Питание горизонта осуществляется на водораздельных пространствах за счет инфильтрации атмосферных осадков через четвертичные, реже альб-сеноманские отложения, разгрузка происходит в местах выклинивания горизонта в долинах рек. Апт-неокомский горизонт эксплуатируется колодцами, буровыми скважинами и каптированными родниками.

Верхнеюрский водоупор (J₃) распространен на северо-востоке, востоке, юго-западе

территории и приурочен к глинистым бат-келловейским и келловейским отложениям. Водоупорные породы представлены плотными жирными глинами с редкими включениями глинистых песков и алевроитов. Мощность водоупора изменяется от долей метра в местах выклинивания до 20 м в пределах долин. Кровля вскрывается на глубине до 50 м, на абсолютных высотах от 180 до 200 м. Водоупор разделяет водоносные горизонты мезозойских (реже четвертичных) и палеозойских отложений. Он обуславливает напорность вод нижележащих отложений, надежно защищает их от поверхностного загрязнения в пределах площади своего распространения.

Келловей-батский водоносный горизонт ($Jbt-cl$) распространен в двух погребенных долинах в северной половине территории. Он приурочен к нижней песчаной пачке прибрежно-континентальных отложений батского и низам келловейского ярусов юры. Водовмещающие пески мелкозернистые, кварцевые, часто глинистые (коэффициент фильтрации от 0.04 до 3.7 м/сутки), с прослоями глин и алевроитов. Мощность песков изменяется от 0 до 14, а местами до 30 м. В кровле горизонта, прослеживающейся на глубинах от 29 до 69 м (абсолютные высоты от 140 до 115 м), залегают бат-келловейские глины, на незначительных участках – обводненные четвертичные образования. Горизонт напорный, высота напора над кровлей колеблется от 23 до 61 м. Уровень воды устанавливается на глубине 9-11 м, на абсолютных высотах 163-176 м. Воды гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.3-0.4 г/л, общей жесткостью 6.6-7.6 мг-экв/л и щелочной средой. Питание горизонта осуществляется за счет подтока вод из окско-тарусских и тульских отложений.

Тарусско-окский водоносный горизонт (C_1ok-tr) распространен на большей части территории за исключением древних четвертичных и бат-келловейских долин на севере, в пределах Барятинского и Серпейского поднятия и современных долин Брыни и Жиздры на юге. В центральной, южной и северо-восточной частях района он является первым от поверхности водоносным горизонтом; выходы его на дневную поверхность отмечены в бассейнах рек Рессы, Течи, Выссы, Локни, Птари, Серены, Пополты, Ковылинки, Дегны, Песочни, Болвы, Неполоди, Которянки и Брыни. Водовмещающие породы представлены трещиноватыми, нередко закарстованными известняками с подчиненными прослоями глин, алевроитов и песков тарусского, веневского, михайловского и алексинского горизонтов нижнего карбона. Мощность водоносного горизонта изменяется от 1 до 60 м. Коэффициент фильтрации известняков изменяется от 0.3 до 97.0, преимущественно составляя 2-25 м/сутки. Глубина залегания кровли изменяется от 0-20 в юго-западной, южной и восточной частях территории до 59-69 м в северо-восточной. Абсолютные высоты кровли убывают от 111 до 228 м. Воды горизонта преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией от 0.1 до 0.8, чаще 0.3-0.4 г/л, общей жесткостью 0.68-17.06 мг-экв/л, величиной рН – 5.8-8.6. Питание горизонта осуществляется на междуречных пространствах за счет инфильтрации атмосферных осадков через четвертичные и мезозойские отложения. Горизонт широко используется для водоснабжения.

Воды спорадического распространения в верхнетульских отложениях ($C_1 tl_2$) развиты на большей части территории, исключая четвертичные палеодолины на северо-востоке, долины Брыни и Жиздры на юге и центральную часть Барятинского поднятия. Воды приурочены к прослоям и линзам песков, известняков, алевроитов и углей, содержащихся в глинистых отложениях нижней части алексинского и верхней части тульского горизонтов (общая мощность отложений от долей метра до 70 м) нижнего карбона. Коэффициент фильтрации песков от 0.01 до 17.5, а известняков – от 0.01 до 77 м/сутки. Мощность водоносных прослоев песков варьируется от 0.5-2.5 до 13.0 м, известняков – от 1-4 до 6, чаще 1-2 м. Воды водоносных линз и прослоев преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.2-0.42 г/л, общей жесткостью 2.0-7.9 мг-экв/л и щелочной средой.

Значение вод верхнетульских отложений для централизованного водоснабжения весьма ограничено в силу невыдержанности водоносных прослоев и небольших запасов воды.

Нижнетульский водоносный горизонт (C_{1tl}) распространен почти повсеместно, отсутствуя лишь на участках Якшуновского, Сухиничского и Козельского поднятий. Он приурочен к нижней песчаной пачке тульского горизонта нижнего карбона (пески с прослоями глин и алевроитов); на дневную поверхность отложения горизонта выходят по правым притокам Угры и Жиздры. Водовмещающие пески преимущественно тонко- и мелкозернистые, иногда глинистые, имеют мощность от долей метра до 50 м. Коэффициент фильтрации песков изменяется от 0.01 до 15.9, чаще составляя 0.01-3.4 м/сутки. Глубина залегания кровли горизонта возрастает от 0-20 до 80-141 м. Абсолютные высоты кровли уменьшаются от 212-180 м на юго-западе территории до 81-100 м на северо-востоке. Воды горизонта гидрокарбонатные кальциевые и гидрокарбонатные кальциево-магниевые, с минерализацией 0.1-0.6, чаще 0.2-0.4 г/л, общей жесткостью 3.8-8.3 мг-экв/л и щелочной средой.

Воды спорадического распространения в бобриковских отложениях (C_{1bb}) широко развиты на территории, отсутствуя лишь в пределах глубоких древнечетвертичных долин. Мощность глинистых отложений изменяется от долей метра в местах выклинивания до 55 м в глубоких частях яснополянских палеодолин, мощность обводненных прослоев алевроитов и мелкозернистых глинистых песков изменяется от 0.5 до 15.0-30.0, углей – от 0.9 до 4.5 м. Коэффициент фильтрации песков составляет 0.01-6.0, углей – 0.01-0.5 м/сутки. Глубина залегания кровли толщи изменяется от 0 до 174 м; абсолютные высоты ее – от 49 до 212 м. Воды преимущественно гидрокарбонатные кальциевые и гидрокарбонатные кальциево-магниевые, с минерализацией 0.3-0.5 г/л, общей жесткостью 4.9-7.9 мг-экв/л и щелочной средой.

Чернышинский водоносный горизонт (C_{1cn}) развит на отдельных небольших участках на юго-западе в районе р. Брынь и пос. Середейский и юго-востоке в районе д. Клыково. Водовмещающие трещиноватые, иногда закарстованные известняки чернышинской толщи черепетского горизонта нижнего карбона имеют мощность от долей метра до 13 м; коэффициент фильтрации их 7.8-130.0 м/сутки и более. Абсолютные высоты уровня горизонта изменяются от 138 до 183 м, при глубине его залегания от 0 до 20 м. Воды горизонта гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.4 г/л, общей жесткостью 5.5-6.2 мг-экв/л и щелочной средой.

Упинский водоносный горизонт (C_{1up}) широко распространен на описываемой территории и отсутствует лишь местами в северной половине ее, в днищах наиболее глубоких яснополянских долин, и на крайнем юго-востоке в долине Жиздры. Он приурочен к трещиноватым, иногда закарстованным известнякам упинского горизонта нижнего карбона с подчиненными прослоями глин и мергелей, общей мощностью от долей метра до 33, при средней мощности 18-25 м. Коэффициент фильтрации известняков изменяется от 0.03 до 52.5, в среднем составляя 0.03-5.0 м/сутки. Воды упинского горизонта напорные. Величина напора колеблется от 52 до 123 м. Уровень воды устанавливается на глубине от 3-5 в долинах рек до 20-40 м на водоразделах, на абсолютных высотах от 174 до 223 м. Воды гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией 0.2-0.9 г/л, общей жесткостью 3.5-13.9 мг-экв/л и величиной рН – 7.3-7.7.

Малевский водоупор (C_{1ml}) распространен почти повсеместно, отсутствуя лишь местами в северной половине площади в днищах наиболее глубоких яснополянских долин и на крайнем юго-востоке ее в долине Жиздры. Слагающие водоупор глины малевского горизонта нижнего карбона имеют мощность от долей метра до 12 м и включают подчиненные прослои известняков и мергелей. Кровля его вскрывается на глубинах от 0 до 187 м, на абсолютных высотах от 156 до 20 м. Малевский водоупор отделяет упинский водоносный горизонт, а на незначительных участках (в пределах глубоких яснополянских долин) спорадически обводненные бобриковские отложения от заволжского горизонта.

Водоудерживающая способность водоупора ослаблена на участках тектонических поднятий.

Заволжский водоносный горизонт ($C_1 zv$) распространен повсеместно и приурочен к одноименным отложениям нижнего карбона. Водовмещающие породы представлены трещиноватыми, загипсованными, иногда закарстованными доломитами, переслаивающимися с мергелями и глинами, общей мощностью от 42 до 54 м, с коэффициентом фильтрации 0.02-24.1, чаще 0.02-1.8 м/сутки. Глубина залегания кровли изменяется от 0 на юго-востоке до 190 м на северо-востоке; абсолютные высоты кровли уменьшаются от 16 до 146 м. Глубина залегания уровня воды изменяется от 0 до 109 м. Абсолютные высоты уровня горизонта на водораздельных участках составляют 155-186 м. Воды горизонта имеют минерализацию от 0.2 до 3.7 г/л. В западной, северо-восточной и южной частях территории воды пресные. На западе и северо-востоке они гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-магниевого, с минерализацией 0.6-0.8 г/л и общей жесткостью 9.5-13.2 мг-экв/л, на юге – гидрокарбонатные кальциевого и кальциево-магниевого, а минерализацией 0.2-0.5 г/л и общей жесткостью 3.1-8.4 мг-экв/л. Заволжский водоносный горизонт является одним из наиболее перспективных при дальнейшем расширении водоснабжения. Наиболее благоприятными для заложения скважин на воду являются участки в пределах Барятинского поднятия.

Фаменский водоносный комплекс (D_3fm) распространен повсеместно. Водовмещающие породы фаменского яруса верхнего девона представлены трещиноватыми доломитами (коэффициент фильтрации их 0.2-0.7 м/сутки) с прослоями иногда загипсованных мергелей и глин, с включением гипса и ангидрита, в основании с песчаниками. Мощность водоносных отложений 120-153 м. Глубина залегания кровли изменяется от 92 до 240 м. В кровле залегают обводненные заволжские доломиты, в подошве доломиты и известняки франского водоносного комплекса. Воды комплекса напорные. Величина напора изменяется от 113 на юго-западе до 177 м на северо-востоке территории. Абсолютные высоты пьезометрического уровня снижаются в северном направлении от 148 до 218 м. Водообильность пород низкая. Удельные дебиты скважин изменяются от 0.01-0.9 л/сек. Воды комплекса изменяются от пресных до солоноватых.

Франский водоносный комплекс (D_3fr) имеет широкое распространение. Комплекс сложен известняками, мергелями, глинами, алевролитами и песками франского яруса верхнего девона. Общая мощность водоносного комплекса составляет около 280 м. Глубина залегания кровли изменяется от 248 до 390 м, абсолютные высоты кровли от «минус» 40 до «минус» 160 м. Комплекс повсеместно гидравлически связан с вышележащим фаменским. Можно предположить, что воды комплекса солоноватые, с общей минерализацией до 10 г/л, сульфатно-хлоридного, хлоридно-сульфатного и хлоридного типа.

Живетский водоносный комплекс ($D_2 gv$) распространен повсеместно и приурочен к одноименным отложениям среднего девона. Породы комплекса представлены песчаниками, песками, алевролитами, глинами, аргиллитами, гипсами и мергелями, общей мощностью 321 м. Глубина залегания кровли комплекса 525 м, абсолютная высота ее минус 597 м. Можно предположить, что в живетских отложениях содержатся соленые воды и рассолы общей минерализацией от 10 до 50 г/л. В районе Калужского поднятия воды комплекса на глубине 870-875 м соленые, имеют хлоридно-натриевый состав с минерализацией 25 г/л.

Вендский водоносный комплекс (PR_{3v})₂ приуроченный к отложениям валдайской серии верхнего протерозоя, распространен на северо-востоке. Породы комплекса представлены здесь аргиллитами с прослоями песчаников и алевролитов. Мощность их 177 м, глубина залегания кровли 846 м, абсолютная высота ее минус 718 м. Воды комплекса напорные (величина напора более 828 м). По химическому составу воды комплекса представляют собой рассолы хлоридно-натриевого состава, с общей минерализацией 91.6 г/л и температурой 25°C.

Водоносная зона трещиноватости кристаллического фундамента ($AR-PR_1$) приурочена к гранито-гнейсам протерозойско-архейского возраста. Вскрытая мощность водоносной зоны

равна 14 м. Гидрогеологического опробования не проводилось. Можно полагать, что в верхней трещиноватой зоне фундамента приурочены рассолы, аналогичные по химическому составу водам вендского комплекса» (Мельникова и др., 1982, стр. 13-16; Малюгина Л.Н., Кулешова Р.И. 1981, листы 36-IV, XII; 37-VII, I; Зекцер, Белоусова, 1990, стр. 21-30).

Условия и характеристика загрязнения водоносных горизонтов приведены в таблице 19.

Как видно из характеристики гидрогеологических условий, они отличаются большим разнообразием водоносных горизонтов как безнапорных, так и напорных, а в целом гидрогеологическое строение территории представляет собой «слоеный пирог». Безнапорные горизонты включают в себя воды четвертичных (аллювиальных, гляциальных, флювиогляциальных, болотных, пролювиальных горизонтов), меловых и юрских отложений. Все горизонты связаны между собой и не имеют выдержанных водоупоров внутри толщи (комплекса).

Напорные водоносные горизонты пресных подземных вод включают в себя множество связанных между собой водоносных горизонтов каменноугольного возраста. Между двумя толщами (водоносными комплексами) залегает выдержанный по площади верхнеюрский водоупор. Ниже каменноугольных горизонтов залегают водоносные горизонты девонского, протерозойского и архейского возраста, содержащие соленые подземные воды и рассолы.

Основной алгоритм оценки защищенности и уязвимости подземных (грунтовых) вод к загрязнению

Защищенность подземных и особенно грунтовых вод, выступающих предметом нашего изучения, от загрязнения сейчас является актуальной проблемой, что подтверждают многочисленные методы для оценки этой проблемы в нашей стране и за рубежом.

Основные положения, которые следует учитывать при оценке и картировании защищенности грунтовых вод, сформулированы в ряде работ (Белоусова, 2001, 2005, 2012; Белоусова, Галактионова, 1994; Белоусова и др., 2006, 2019).

Основные понятия и оцениваемые показатели

Рассмотрим основные понятия и алгоритм выполнения методики оценки защищенности и уязвимости подземных (грунтовых вод) к загрязнению.

1. Приведем определения основных оцениваемых показателей.

Защитная зона – это зона, отделяющая подземные воды от поверхностного загрязнения и имеющая двухуровневое строение: почвы и породы зоны аэрации. *Защищенность* – способность защитной зоны препятствовать проникновению загрязнения в подземные воды в течение определенного времени. Отношение реальной техногенной нагрузки изучаемой территории к естественной защищенности подземных вод называется их *уязвимостью* к загрязнению. Вещество считается загрязняющим, если его концентрации превышают фоновые значения. Следовательно, при оценке защищенности будем учитывать особенности строения защитной зоны, отделяющей грунтовые воды от поверхностного загрязнения, и процессы, происходящие в ней под влиянием загрязнения.

2. В защитной (ненасыщенной) зоне движение влаги, а с ней и загрязняющих веществ, как правило, носит вертикальный одномерный характер, что упрощает и математический аппарат для оценки защищенности, и картирование. В грунтовых водах, в первом от поверхности водоносном горизонте и следующих за ним напорных горизонтах движение потоков подземных вод и загрязняющих веществ имеют трехмерный характер, что усложняет математический аппарат, описывающий эти процессы, и делает нецелесообразным их учет при построении карт защищенности вод и построение карт защищенности горизонтов.

Таблица 19. Характеристика загрязнения водоносных горизонтов. **Table 19.** Characterization of pollution of aquifers.

Названия водоносных горизонтов	Загрязняющее вещество	Количество (мг/л)	ПДК (мг/л)	Коэффициент распределения, K_d (мг/л)
Водоносный горизонт современных аллювиальных отложений	SO_4^{2-}		500	0.36(П)
	Cl		350	
	NO_3^-	2.7-60.0	45	
Валдайско-московский водоносный горизонт водно-ледниковых отложений	Cl		0.3-0.5	
Воды спорадического распространения московской морены	NO_3^-	до 68.6	45	
Московско-днепровский водоносный горизонт водно-ледниковых отложений	Cl		350	
	SO_4^{2-}		500	0.36(П)
	Na		200	
Воды спорадического распространения днепровской морены	NO_3^-		45	
Воды современных болотных образований	Fe		0.3-1.0	28(Сг), 40(Сп), 20(П)
	NH_3		2.0 (по азоту)	
Верхнечетвертичный аллювиальный водоносный горизонт	F	0.08-0.38	1.5	
	Ba	0.01-0.32	0.1	3.43-6.36(Г)
	Br	0.19-0.27	0.2	
	Cl	до 147.1	350	
	SO_4^{2-}	до 116.5	500	0.36(П)
	Нитрат-ион	до 229.0	3.0	
	Zn	0.006-0.3	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
Sr	0.01-1.8	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)	
Верховодка в верхне-четвертичных перигляциальных и делювиальных образованиях	Cl	до 112.7	350	
	Азотистые соединения	до 92.8		
	NO_3^-	2.1-174	45	
Верхнемосковский конечно-моренный водоносный горизонт	F	до 0.25	1.5	
	Ba	до 0.16	0.1	3.43-6.36(Г)
	Cl	до 100.7	350	
	NO_3^-	до 37.1	45	
Верхнемосковская ледниковая спорадически обводненная толща	F	до 0.5	1.5	
	Ba	до 0.12	0.1	3.43-6.36(Г)
	I	до 0.22	0.125	
	Cl-	до 346.5	350	

Продолжение таблицы 19.

Названия водоносных горизонтов	Загрязняющее вещество	Количество (мг/л)	ПДК (мг/л)	Коэффициент распределения, К _д (мг/л)
	SO₄²⁻	до 235.8	500	0.36(П)
	NO₃⁻	до 180.0	45	
	Zn	0.006-0.6	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
	Sr	0.01-0.15	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
Нижне-верхнемосковский водно-ледниковый водоносный горизонт	F	до 0.42	1.5	
	Ba	до 0.34	0.1	3.43-6.36(Г)
	I	до 0.13	0.125	
	Li	0.041	0.03	
	Cl ⁻	до 232.6	350	
	NO₃⁻	до 264.0	45	
Днепровско-окский аллювиально-флювиогляциальный водоносный горизонт	Zn	0.01-0.03	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
	Sr	0.03-0.08	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
	Ba	0.01	0.1	3.43-6.36(Г)
Миоценовый водоносный горизонт	NO₃⁻	90.6-184.0	45	
Сантон-туронский водоносный комплекс	Cl ⁻	до 188.9	350	
	NO₃⁻	до 74.3	45	
Сеноман-альбский водоносный горизонт	Cl ⁻	до 129.8	350	
	Zn	0.15-2.0	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
	Sr	0.01-1.0	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
	NO₃⁻	79.7-124	45	
	Ba	0.01-0.04	0.1	3.43-6.36(Г)
Апт-неокомский водоносный горизонт	Cl ⁻	до 209.2-232.0	350	
	NO₃⁻	до 210-232	45	
	Zn	0.01-0.04	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
	F	0.13-0.38	1.5	
Келловей-батский водоносный горизонт	Zn	0.01-0.08	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
	Sr	0.03	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
Тарусско-окский водоносный горизонт	F	до 0.5	1.5	
	Ba	0.2	0.1	3.43-6.36(Г)
	Br	0.51	0.2	
	I	0.47	0.125	
	Cl ⁻	до 117.9	350	
	NO₃⁻	до 190	45	
	Fe	до 8.2	0.3-1.0	28(Сг), 40(Сп), 20(П)
	Zn	0.006-3.0	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
	Sr	0.01-0.8	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)

Продолжение таблицы 19.

Названия водоносных горизонтов	Загрязняющее вещество	Количество (мг/л)	ПДК (мг/л)	Коэффициент распределения, K_d , (мг/л)
Воды спорадического распространения в верхнетульских отложениях	Zn	0.02-0.03	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
	Sr	0.05-0.1	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
	Ba	0.03	0.1	3.43-6.36(Г)
Нижнетульский водоносный горизонт	Sr	0.06-0.3	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
	Ba	0.01	0.1	3.43-6.36(Г)
	F	0.13	1.5	
Упинский водоносный горизонт	NO_3^-	до 32	45	
	F	0.08-1.75	1.5	
	Ba	0.05-0.74	0.1	3.43-6.36(Г)
Заволжский водоносный горизонт	Sr	1.4-18.7	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
	Zn	0.002-0.03	5.0	400(Сг), 200(Сп), 30(П)
	Sr	3.1-14.4	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
	Ba	0.03-2.32	0.1	3.43-6.36(Г)
	Li	0.03-0.65	0.03	
	F	0.1-0.86	1.5	
Фаменский водоносный комплекс	NO_3^-	до 104	45	
	F	0.13-1.5	1.5	
	Sr	0.6-5	7.0	97(Сг), 7.5(Сп), 1.75(П)
	Ba	0.08-0.62	0.1	3.43-6.36(Г)

Примечания к таблице 19: П – пески, Г – глины, Сп – супеси, Сг – суглинки.

3. Карты защищенности в такой постановке имеет смысл строить только для грунтовых вод. Карты носят оценочный (приближенный характер), что также подтверждает положение, приведенное в пункте 2. В связи с этим названные карты могут быть использованы для приближенной оценки развития ситуации и принятия предварительных инженерных решений, а также стать основой для проектирования исследований более крупного масштаба и построения геофильтрационной и геомиграционной моделей защитной зоны для дальнейших прогнозных расчетов изменения загрязнения в ней и грунтовых водах.

4. В связи с тем что оценка защищенности, как правило, имеет картографическое выражение, необходимо в первую очередь установить масштаб этой оценки, затем выполнить все требования (кондиции) к исходному материалу (содержание, качество, количество) для данного масштаба исследований. Кроме этого необходимо соблюсти следующие требования: карты должны быть просты в построении и легко читаемые при использовании.

Карты защищенности целесообразно строить в среднем масштабе (1:200000 и 1:100000), как наиболее отвечающем возможностям осуществить оценку защищенности на качественном и количественном уровнях. Для мелкомасштабных построений в крупных регионах следует использовать только качественные оценки природного защитного потенциала защитной зоны без учета физико-химических процессов, протекающих в ней. Построение крупномасштабных карт для локальных и точечных объектов теряет смысл, если исходить из требований к исходным материалам для такого масштаба, которому необходимы не только данные о геологическом и гидрогеологическом строении территории, но и параметры процессов движения влаги (потоков) и загрязняющих веществ.

При наличии этих данных нет необходимости строить приближенные карты, а есть

смысл, используя точные математические методы, провести моделирование процессов загрязнения и затем построить любые прогнозные карты, характеризующиеся высокой достоверностью.

5. Для построения карты необходимо располагать следующими сведениями о защитной зоне и грунтовых водах: рельеф местности, его уклоны, характер гидрографической сети; метеорологические данные – величину атмосферных осадков; литологическое строение защитной зоны; фильтрационные свойства пород, слагающих защитную зону; ее мощность или глубину залегания грунтовых вод; величины поверхностного и подземного стоков и их соотношения; величину инфильтрационного питания грунтовых вод и их режим.

В связи с этим необходимо иметь следующие данные о загрязняющих веществах: тип источника загрязнения (точечный, площадной – диффузный); тип вещества (воздушный – аэрозольный, жидкий, твердый); объем выброса загрязняющих веществ; их химический состав; время воздействия загрязняющего вещества на окружающую среду; миграционные свойства как фильтрационной среды, так и загрязняющих веществ; физико-химические процессы, сопровождающие миграцию загрязняющих веществ; основные параметры процесса, оказывающего наибольшее влияние на взаимодействие в системе порода – вода.

6. Следующим важным аспектом является установление критериев оценки защищенности. «Главный фактор для выбора критериев оценки защищенности – степень токсичности загрязняющего вещества, имеющая следующие градации:

I категория – чрезвычайно опасные химические элементы, содержание которых в подземных водах не может превышать 1.0 мг/л;

II категория – высокоопасные и умеренно опасные химические элементы, содержание которых в подземных водах может изменяться от 1.0 до 10.0 мг/л;

III категория – малоопасные химические элементы, содержание которых в подземных водах может превышать 10 мг/л» (Белюсова, 2012, стр. 12).

Следовательно, категории оценки защищенности грунтовых вод должны устанавливаться с учетом категорий токсичности загрязняющих веществ. Большинство из нормируемых в нашей стране элементов относится к категории чрезвычайно опасных загрязняющих веществ. Для них следует применить самый жесткий подход при выборе категории оценки защищенности грунтовых вод от них. Для этого случая примем концепцию о беспороговой концентрации этих химических элементов в грунтовых водах. Наиболее подходящей оценкой защищенности грунтовых вод от загрязнения чрезвычайно опасными загрязняющими веществами является время проникновения (t_3) загрязняющего вещества через защитную зону в грунтовые воды.

Для оценки защищенности грунтовых вод от загрязнения высоко и умеренно опасными загрязняющими веществами целесообразно использовать менее жесткую оценку: если поверхностное загрязнение этими веществами очень сильное (более 5 ПДК), то защищенность грунтовых вод следует оценивать как для чрезвычайно опасных загрязняющих веществ, а если поверхностное загрязнение не более 5 ПДК, то оценивать защищенность можно как для малоопасных загрязняющих веществ.

Для оценки защищенности грунтовых вод от загрязнения малоопасными веществами используем самую мягкую оценку – время достижения загрязняющим веществом в инфильтрующемся потоке на границе с грунтовыми водами ПДК.

Анализ радиационной обстановки после аварии на ЧАЭС показал наличие загрязнения в грунтовых водах радионуклидами на территориях Российской Федерации, пострадавших от Чернобыльской аварии, только уровень этого реального загрязнения не превышает предельный уровень (ПУ) и ПДК. Поэтому рассмотрим на примере радиоактивного загрязнения (как наиболее проявившегося на изучаемой территории) методику оценки защищенности и уязвимости грунтовых вод к этому типу загрязнения.

Среднемасштабная оценка защищенности грунтовых вод от загрязнения чрезвычайно опасными загрязняющими веществами, включая радионуклиды

Оценка защищенности грунтовых вод осуществляется для предельных условий, когда предполагается, что загрязнение данными загрязняющими веществами распространяется на всю исследуемую территорию вне зависимости от его интенсивности.

Оценка защищенности и уязвимости грунтовых вод к радиоактивному загрязнению специфична. В общепринятом у гидрогеологов смысле защитная зона, отделяющая грунтовые воды от поверхностного загрязнения, – зона аэрации. В случае попадания радионуклидов на поверхность земли защитной зоной (буфером) более высокого порядка являются почвы, способные связать большое количество радионуклидов. Зона, защищающая подземные воды от радиоактивного загрязнения, имеет двухуровневое строение: первый уровень – почвы, второй – породы зоны аэрации. Для построения карт защищенности и уязвимости грунтовых вод к загрязнению необходимо иметь комплект карт, последовательность построения которых отражена ниже. Составление карт ведется в среднем масштабе (1:200 000).

Построение карты защитной зоны. При построении такой карты (Белоусова, 2001, 2003; Белоусова и др., 2006) первый уровень защитной зоны отражается на почвенной карте (за основу принята «Государственная почвенная карта СССР» (1953)), на которой показывается тип почв и их механический состав. Строение второго уровня защитной зоны характеризуется двумя картами: глубин залегания грунтовых вод и литологического строения зоны аэрации. Карта глубин залегания грунтовых вод строится по общепринятой в практике гидрогеологических исследований методике со следующими градациями глубин залегания: 0-3, 3-5 м (отражают условия усиленной миграции радионуклидов и условия подтопления территории); 5-10 м (глубина проникновения радионуклидов за год), последняя может достигать 0.6 м для ^{90}Sr и 0.45 м для ^{137}Cs . Тогда за период T (период полураспада ~ 30 лет), называемый средней продолжительностью жизни радионуклида, он может проникнуть на глубину 10 м до распада (эти данные носят единичный характер, в основных работах почвоведов скорость проникновения радионуклидов в почвенный слой в несколько раз меньше, но в специфических природных условиях она может значительно увеличиваться). Последующие градации выбираются в зависимости от значений максимальных глубин залегания ГВ на изучаемой территории с шагом через 5 или 10 м (в нашем случае 10-20 и более 20 м), для построения карты глубины залегания грунтовых вод использовались гидрогеологические карты (Государственная ..., 1972-1976). Для характеристики второго уровня защитной зоны использовались карты четвертичных отложений (Государственная ..., 1976-1980), на которых обобщены сведения о литологии, водно-физических и фильтрационных свойствах пород зоны аэрации по всем генерализованным литолого-генетическим комплексам. По характеру сложения защитной зоны в ее разрезе выделяется три типа литологического строения: одно-, двух- и трехслойное.

Карта защитной зоны получается путем наложения почвенной карты, отображающей строение ее первого уровня, и карт, характеризующих строение второго уровня защитной зоны (глубин залегания и литологического строения зоны аэрации). На карте выделяются типовые участки, характеризующиеся определенным строением первого и второго уровней защитной зоны и глубиной залегания грунтовых вод, описание этих типовых участков приведено в легенде к карте.

Обобщенная информация о свойствах почв и пород зоны аэрации: физико-механических (количество пылеватых и глинистых частиц), водно-физических (объемная масса, объемная масса скелета грунта, пористость, естественная влажность, полная влагоемкость); агрохимических (количество гумуса); о параметрах процесса фильтрации (коэффициент

фильтрации, величина инфильтрационного питания). Коэффициент фильтрации обычно устанавливается по данным гидрогеологических и инженерно-геологических исследований. Величина инфильтрационного питания может быть получена по данным наблюдений за режимом грунтовых вод, а также по результатам специальных исследований, связанных с изучением влагопереноса. Она определяет интенсивность миграционных процессов радионуклидов в защитной зоне, скорость их продвижения к грунтовым водам, что и вызывает необходимость более точного ее определения для каждого типа строения защитной зоны.

Следующий этап построения карты защитной зоны – установление категорий для характеристики природного потенциала защитной зоны и ее способности защитить грунтовые воды от загрязнения любого типа (радионуклидами, тяжелыми металлами, нитратами и др.). Защищенных подземных вод в природе в настоящее время практически нет, о чем свидетельствует наличие нитратного загрязнения в глубоких водоносных горизонтах, а также существование «быстрых» путей миграции естественного и техногенного происхождения. При выделении категорий учитывается следующее:

1) наличие или отсутствие защитных свойств у почвенного покрова (если почвы сложены суглинками и глиной, защитные свойства присутствуют, если песками и супесями – отсутствуют);

2) наличие или отсутствие защитных свойств пород зоны аэрации:

– при однослойном строении зоны аэрации выбор производится аналогично пункту 1;

– при многослойном строении важно установить в разрезе зоны аэрации чередование проницаемых и слабопроницаемых прослоев, что влияет на характер влагопереноса и миграцию загрязняющих веществ;

– все выделенные типы строения зоны аэрации располагаются в порядке ухудшения проницаемости пород: пески – супеси – переслаивание пород (в начале располагаются разрезы, в которых проницаемые отложения залегают первыми от поверхности, затем разрезы со слабопроницаемыми верхними слоями и последними следуют разрезы с обратной слоистостью) – суглинки – глины;

3) глубина залегания грунтовых вод, определяющая мощность зоны аэрации и время достижения фронтом инфильтрующихся загрязненных вод грунтового водоносного горизонта.

По соотношению литологического строения первого и второго уровней защитной зоны и глубине залегания грунтовых вод на качественном уровне были установлены следующие категории защитного потенциала защитной зоны (Белоусова, 2012):

– чрезвычайно слабый защитный потенциал;

– слабый защитный потенциал;

– средний защитный потенциал;

– высокий защитный потенциал.

Наличие в разрезе защитной зоны (в двух ее уровнях) проницаемых пород при малой глубине залегания грунтовых вод обуславливает плохие защитные свойства защитной зоны; по мере увеличения глубины залегания грунтовых вод и появления в разрезе слабопроницаемых пород защитный потенциал этой зоны усиливается и продвижение загрязняющих веществ через нее замедляется.

Карта защитной зоны является базовой для построения карт защищенности и уязвимости грунтовых вод к любым загрязняющим веществам.

Построение карты защищенности грунтовых вод от загрязнения радионуклидами. При оценке возможности загрязнения грунтовых вод радионуклидами учитываются: сорбционные свойства, обеспечивающие задержание радионуклидов почвами и породами зоны аэрации, ограничение интенсивности продвижения (вплоть до полного задержания) с инфильтрационным потоком до грунтовых вод; миграционные свойства почв и пород зоны

аэрации, зависящие от физико-механических, водно-физических, фильтрационных свойств, их минералогического состава и характеризующие интенсивность продвижения фронта загрязненных инфильтрующихся вод в глубь зоны аэрации до грунтовых вод; путь фильтрации (инфильтрации), то есть мощность зоны аэрации или глубина залегания грунтовых вод; период полураспада радионуклидов; форма миграции радионуклидов (ионная, комплексная и др.); интенсивность процесса разбавления загрязненного инфильтрационного потока грунтовых вод; наличие «быстрых» путей миграции (трещины, крупные поры, ходы корней, кротовины и другие естественные нарушения, содержащиеся в почвах и породах зоны аэрации, а также колодцы, скважины и другие инженерные сооружения, вскрывающие подземные воды и в случае пристенной⁶ фильтрации являющиеся источниками загрязнения).

Особенности миграции радионуклидов. Параметры переноса радионуклидов зависят от разных факторов. В работах А.В. Коноплева с соавторами (1988) и Б.С. Пристера с соавторами (1990) отмечается зависимость коэффициента диффузии радионуклидов от влажности почв. Многими исследователями (Изотопы в гидросфере, 1989) получен ряд подвижности радионуклидов в почвах в порядке увеличения их миграционной способности и скорости поступления в грунтовые и поверхностные воды: ^{144}Ce , ^{95}Nb , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr . Принято обобщенно оценивать сорбционную способность почв с помощью коэффициента распределения K_p , равного отношению концентрации радионуклидов в единичном объеме грунта к равновесному содержанию его в водном растворе, находящемся в контакте с данным образцом породы (Семенютин и др., 1989; Яковлев, 1988).

Поглощение долгоживущих радионуклидов (например, ^{137}Cs , ^{90}Sr) песчано-глинистыми грунтами увеличивается с уменьшением крупности минеральных частиц и ростом содержания пылеватого и глинистого материала (Семенютин и др., 1989; Колобов, Хитров, 1990). При этом наибольшей миграционной способностью обладает ^{90}Sr , для которого минимальное значение K_p равно 10, что значительно меньше значения $K_p \sim (10 \cdot 10^3)$ для ^{137}Cs . Вертикальная миграция радионуклидов возрастает в более легких по механическому составу почвах, а также в почвах, содержащих меньшее количество органического вещества. Экспериментально установлено, что процесс миграции радионуклидов в горизонте почв 0-5 см развивается медленнее, чем в горизонте 5-20 см в первые два года после аварии, а затем скорости процессов выравниваются (Пристер и др., 1990; Семенютин и др., 1989).

На миграцию радионуклидов, находящихся в растворенном состоянии и на коллоидных частицах, помимо состава почвы и метеорологических условий существенно влияют физико-химические свойства радиоактивных изотопов (^{90}Sr в отличие от ^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{144}Ce мигрирует главным образом в виде обменных форм с инфильтрационным потоком). Обменные формы мигрируют быстрее необменных, поэтому с ростом глубины в вертикальной миграции радионуклидов должен увеличиваться перенос обменных форм и проявляться в большей степени влияние индивидуальных специфических химических свойств радионуклидов. Миграция ^{137}Cs и других подобных ему радионуклидов, преобладающих в верхнем слое почвы, может происходить и за счет засыпания (лессиваж) частиц в трещины и биоперемешивания (Пристер и др., 1990). Доля обменного ^{90}Sr в почве составляет 5-36% валового его содержания, а 82-99% валового содержания ^{137}Cs в почве находится в необменном состоянии (Коноплев, 1988). В работе Б.С. Пристера с соавторами (1990) отмечено, что скорость миграции ^{90}Sr близка к скорости конвективного переноса. Исследования, проведенные в Средней Азии, показали, что скорость миграции ^{90}Sr достигает 60-70 см/год при периодическом орошении, и 120-150 см/год при регулярном. Скорость

⁶ Пристенная фильтрация – это ускоренный путь миграции вдоль ствола скважины в случае недостаточной герметичности.

миграции ^{137}Cs также увеличивается (Алексахин, 1992; Круглов и др., 1990).

Существенна роль растительного покрова в вертикальной миграции радионуклидов. При густом растительном покрове сорбируется ~80% выпавших радионуклидов, при редком – 40%. В лесу основное количество выпавших радионуклидов задерживается подстилкой, под подстилку проникает около 10% радионуклидов (Проблемы ..., 1992).

В ряде научных публикаций (Оценка и прогноз ..., 2001; Проблемы ..., 1992; Павлоцкая, 1992) обозначен факт того, что радионуклиды в почвах содержатся в водорастворимой (катионной, анионной и нейтральной), легкорастворимой (подвижной), кислоторастворимой и аморфной формах. Выявлено также, что ^{90}Sr в основном находится в хорошо растворимых органических веществах и их соединениях с химическими элементами, в первую очередь с железом и алюминием. Обнаружение анионной формы ^{90}Sr в водорастворимом состоянии и в гумусовых кислотах свидетельствует о нахождении его в комплексных соединениях. К общему характеру поведения радионуклидов относятся их повышенное содержание на дне балок, у подножия склонов, притеррасных понижениях и поймах рек, в болотах на водосборных территориях, являющихся местным геохимическим барьером на пути выноса химических элементов. Их минимальное количество наблюдается на склонах и сильно обводненных почвах, а также на хорошо дренируемых и аэрируемых песчаных почвах водоразделов. Следует отметить двойную роль органического вещества, гумусовых кислот в миграции радионуклидов. С одной стороны, они содействуют увеличению поглощения и прочности связи радионуклидов с почвами, с другой – переходу радионуклидов в подвижное состояние.

В ряде работ (Оценка и прогноз ..., 2001; Семенютин и др., 1989; Павлоцкая, 1992) показано, что своеобразной аномалией (характеризующейся наибольшей подвижностью радионуклидов) являются районы Украинского и Белорусского полесий, а также ряд областей России. Распространение в этих районах малоплодородных дерново-подзолистых и торфянистых почв легкого (песчаного и супесчаного гранулометрического состава) гидроморфного типа приводит к тому, что подвижность ^{137}Cs , ^{90}Sr в этих почвах заметно выше, чем в почвах более тяжелого механического состава, обогащенных гумусом, кальцием и другими обменными основаниями, с более высоким рН.

В работе А.И. Бурнадяна (1990) анализируется состояние радиоактивного следа в районе комбината «Маяк», Челябинская область. Показано, что ^{90}Sr в верхнем слое почвы содержится в обменной форме (72-95%) и что его значительная часть находится в комплексе с органическим веществом почвы (с фульвокислотами). За 10 лет наблюдений установлен ряд почв по степени увеличения накопления радионуклидов в слое 5-30 см: чернозем > серая лесная > солончак > торфяно-болотная > дерново-подзолистая > солодь луговая, что свидетельствует о том, солодь луговая обладает самыми высокими миграционными свойствами. Данные показывают, что наблюдается медленный переход радиоактивных изотопов в нижние слои почвы из верхнего 5-см слоя со скоростью 2-5% в год. Однако основная доля радиоактивных изотопов (60-80%) во всех типах целинных почв через 12 лет после выпадения находится в верхнем корнеобитаемом слое.

В работе Г.И. Антоненко с соавторами (1994) подтверждается тот факт, что на дерново-подзолистой почве скорость взаимодействия ^{137}Cs с почвой выше, чем на черноземе и аллювиально-слоистой почве.

В публикациях (Кудельский и др., 1997) приводится информация о том, что с 1987 по 1994 гг. наблюдалось уменьшение загрязнения речных вод, которое не связано с естественным распадом радионуклидов. Данные показали, что помимо радиоактивного распада на концентрацию радионуклидов влияет перераспределение радиоактивных продуктов по вертикальному профилю почв водосборных территорий, которое приводит к снижению уровня загрязнения приповерхностного почвенного слоя и, как следствие, к

уменьшению поверхностного смыва радионуклидов.

Известно, что радионуклид ^{137}Cs , как правило, присутствует в необменной форме и мигрирует диффузионным путем, а ^{90}Sr в основном находится в обменной форме и соответственно мигрирует в десятки раз интенсивнее ^{137}Cs , механизм его движения в большей степени отвечает условиям конвективного переноса. При перемещении фронта загрязнения возникает дисперсия скоростей потока. С позиций математического моделирования массопереноса в нашем понимании (Белоусова, 2001) для переноса радионуклидов можно выделить диффузионную модель для ^{137}Cs и дисперсионную модель для ^{90}Sr , в зависимости от строения фильтрационной среды она имеет две модификации: микродисперсию для гомогенной среды с двойной пористостью и макродисперсию для гетерогенной среды (гетерогенно-блоковой и среды с упорядоченной неоднородностью). Диффузия характеризуется коэффициентом молекулярной диффузии, дисперсия – коэффициентом дисперсии для каждого радионуклида и структурным параметром среды, определяемыми по нейтральному ингредиенту.

Миграция радионуклидов сопровождается физико-химическими процессами. К таким процессам могут быть отнесены: ионный обмен, сорбция – десорбция, растворение – осаждение, выщелачивание, радиоактивный распад, осмос, комплексообразование и другие. Сорбция радионуклидов почвами более изучена по сравнению с сорбцией породами зоны аэрации, остальные процессы практически не изучены. Основным параметром, характеризующий сорбцию, – коэффициент распределения радионуклида.

В связи с тем что на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению в пределах России, экспериментально параметры массопереноса радионуклидов не определялись, был проанализирован и обобщен опыт наблюдений отечественных и зарубежных специалистов за поведением радионуклидов чернобыльского происхождения на Украине и в Белоруссии и представлены результаты исследований по глобальным выпадениям радионуклидов на территории бывшего СССР (начиная с 50-х годов), данные экспериментальных и натуральных наблюдений, проведенных за рубежом.

По результатам обобщения литературных и опытных данных (Белоусова, 2001) был сделан ряд выводов.

По интенсивности миграции ^{90}Sr значительно опережает ^{137}Cs (первому соответствует конвективный, а второму – диффузионный механизм переноса, что выражается в различии, в основном на два порядка, коэффициентов дисперсии и диффузии);

« ^{90}Sr меньше сорбируется почвами и породами зоны аэрации, чем ^{137}Cs . Наибольшими сорбционными способностями обладает чернозем $K_p=490-1150$ (^{90}Sr) и $1200-10000$ мл/г (^{137}Cs). Для серых лесных почв $K_p=6-180$ (^{90}Sr) и $36-6100$ мл/г (^{137}Cs). Для подзолистых почв $K_p=3-700$ (^{90}Sr) и $40-1500$ мл/г (^{137}Cs) (супесчаные и суглинистые почвы). Для аллювиальных и подзолистых песчаных почв $K_p=5-10$ (^{90}Sr) и $20-400$ мл/г (^{137}Cs). Для пород зоны аэрации характерны следующие значения: пески $K_p=1-100$ (^{90}Sr) и $10-300$ мл/г (^{137}Cs); суглинки (глины) $K_p=6-200$ (^{90}Sr) и $26-1000$ мл/г (^{137}Cs).

Неоднозначными сорбционными свойствами обладают торфяники. По данным одних исследователей они имеют наименьшую сорбционную способность $K_p=2-10$ (^{90}Sr) и $5-190$ мл/г (^{137}Cs), а по данным других исследователей – наибольшую сорбционную способность $K_p=400-700$ (^{90}Sr) и $2000-5000$ мл/г (^{137}Cs)» (Круглов и др., 1990; Прохоров, 1981). Это, по-видимому, связано со сложными условиями строения и формирования болот: от типа болот (верховые, низинные, переходные), от степени их проточности, от степени разложения торфов, от состава гумусовых, фульво- и низкомолекулярных кислот, от состава комплексных соединений металлов и др., что требует детального изучения болот.

Почвы обладают наибольшей удерживающей способностью по отношению к радионуклидам, что и определяет их как буфер более высокого порядка, чем породы зоны

аэрации. При оценке защищенности подземных вод их необходимо учитывать.

Следующий этап построения карты – установление категорий защищенности грунтовых вод от загрязнения. Выделяются пять категорий защищенности грунтовых вод от загрязнения: незащищенные, слабо защищенные, средне защищенные и условно защищенные и защищенные. Самые токсичные из долгоживущих радионуклидов – ^{90}Sr и ^{137}Cs , поэтому оценка защищенности должна проводиться отдельно по каждому радионуклиду.

Защищенность грунтовых вод от любого загрязняющего вещества зависит от времени достижения фронтом загрязненных инфильтрационных вод водоносного горизонта (t_3). Время прохождения растворенным в воде радионуклидом толщи почв и пород зоны аэрации мощностью M с заполнением их сорбционной емкости и последующим достижением грунтовых вод можно определить по формуле 1 (Белоусова, 2005):

$$t_{\zeta} = \frac{M \theta_i}{v} + \frac{M \theta \delta K_p}{W} \quad (1),$$

где K_p , л/кг – коэффициент распределения; δ , кг/дм³ – объемная масса скелета грунта, θn – полная влагоемкость (в долях единицы); v , м/сут. – скорость просачивания инфильтрационного потока, который рассчитывается по формуле 2 (Биндеман, 1963):

$$v = \frac{1}{\theta} \sqrt[3]{W^2 k_{\phi}} \quad (2),$$

где θ – естественная влажность пород (в долях единицы), W – инфильтрационное питание (м/сут); k_{ϕ} – коэффициент фильтрации (м/сут).

Первое слагаемое в формуле 1 характеризует движение влаги в ненасыщенной зоне (или движение нейтрального загрязняющего вещества), второе – физико-химическое взаимодействие (сорбцию) в системе порода – вода (или задержку вещества породой). В случае, когда коэффициент распределения значительно превышает единицу (как это характерно для радионуклидов), первым слагаемым в формуле 1 можно пренебречь, также как и вторым, когда коэффициент распределения значительно меньше единицы.

Шкала категорий естественной защищенности грунтовых вод от загрязнения была построена с учётом T – периода полураспада радионуклида. Поскольку период полураспада радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr близка к 30 годам, то выделены следующие категории:

- незащищенные грунтовые воды: 30 лет $>t_3 < T$;
- слабо защищенные: $T < t_3 < 2T$ и 30 лет $< t < 60$ лет;
- средне защищенные: $2T < t_3 < 3T$ и 60 лет $< t < 100$ лет;
- условно защищенные: 100 лет $> t_3 > 3T$ и 100 лет $< t < 300$ лет;
- защищенные: 300 лет $< t_3 > 10T$.

Выделение категорий по времени продвижения загрязняющего вещества через защитную зону по существу является приближенной прогнозной оценкой процесса загрязнения грунтовых вод в данном случае радионуклидами.

Карты естественной защищенности грунтовых вод от загрязнения ^{90}Sr и ^{137}Cs строятся на основе карты защитной зоны. Сравнение карт показывает, что наиболее опасен для грунтовых вод ^{90}Sr , так как загрязнение им может охватить в короткий период (меньше 5 лет) большие участки водоносного горизонта.

Обсуждение результатов среднемасштабной (1:200000) оценки защищенности грунтовых вод от загрязнения радионуклидами

Основными радионуклидами в выпадениях в зоне радиоактивного следа на территории Калужской области являются ^{137}Cs и ^{90}Sr . За прошедшие 30 лет после аварии активность этих

радионуклидов в поверхностных выпадениях должна снизиться вдвое против начальной, сразу после аварии, так как период полураспада их составляет около 30 лет.

Для построения карт защищенности грунтовых вод от загрязнения необходимо иметь комплект карт.

Карта защитной зоны. В связи со сложным литологическим строением защитной зоны (до четырехслойного) для установления потенциала защитной зоны был использован «весовой⁷» метод оценки всех ее составляющих с присвоением им весовых значений от самых малых для характеристики слабых защитных свойств (например: песчаные почвы, пески зоны аэрации, малые глубины залегания грунтовых вод) до высоких защитных свойств (почвы с высоким содержанием гумуса, глины и большие глубины залегания грунтовых вод) с последующим суммированием всех взвешенных показателей (строения почв, послойным строением зоны аэрации и глубины залегания грунтовых вод) для всех типовых участков (табл. 19). Потенциал защитной зоны установлен по следующим весовым интервалам: слабый – 4-8, средний – 9-13, высокий – 14-17.

На карте защитной зоны (рис. 10) площади со слабым защитным потенциалом приурочены к долинам рек в зоне радиоактивного следа на территории Калужской области, водораздельные пространства характеризуются средним защитным потенциалом, и только локальные участки на юго-западе, западе и северо-западе отличаются сильным защитным потенциалом.

Карты защищенности грунтовых вод от загрязнения радионуклидами. Оценка защищенности грунтовых вод от загрязнения радионуклидами была составлена по методике, изложенной в ряде работ (Белоусова, 2001, 2005, 2012), отдельно для таких радионуклидов как ^{90}Sr и ^{137}Cs с применением ГИС-технологий. Для каждого из 81 выделенного типового участка на карте защитной зоны (рис. 10) по формуле 1 с учетом строения каждого участка (табл. 20) и особенностей строения защитной зоны и параметров сорбции (табл. 21) рассчитывалось время миграции радионуклидов через защитную зону в грунтовые воды (табл. 22).

На построенной карте защищенности грунтовых вод от загрязнения ^{90}Sr видно (рис. 11), что около 50% территории относятся к незащищенным от загрязнения ^{90}Sr , 20% слабо защищены, еще 20% условно защищены, в основном на севере, и по 5% средне защищенные и защищенные грунтовые воды.

Из-за разницы миграционных свойств рассматриваемых радионуклидов, при загрязнении ^{137}Cs складывается иная ситуация (рис. 12): незащищенные грунтовые воды расположены только к узкой полосе вдоль русел рек, слабо защищенные приурочены к долинам нескольких малых рек на северо-западе, средне защищенные – к высоким надпойменным террасам рек, условно защищенные примыкают к водоразделам, преобладают условно защищенные и защищенные грунтовые воды.

Таким образом, определение времени продвижения радионуклидов через защитную зону позволяет дать приближенную прогнозную оценку процесса загрязнения грунтовых вод этим чрезвычайно опасным загрязняющим веществом.

Методика оценки уязвимости грунтовых вод к загрязнению чрезвычайно опасными загрязняющими веществами (радионуклидами)

Отношение реальной техногенной нагрузки изучаемой территории к защищенности грунтовых вод мы будем называть уязвимостью грунтовых вод к загрязнению. Исследования

⁷ Весовые показатели – безразмерные величины, цифровое значение которых изменялось от 0 до величины, соответствующей количеству показателей конкретного параметра и по увеличению степени его негативного влияния на окружающую среду, чтобы затем путем простых арифметических действий можно было оценить суммарное воздействие всех параметров на изучаемый процесс.

проводятся в среднем масштабе.

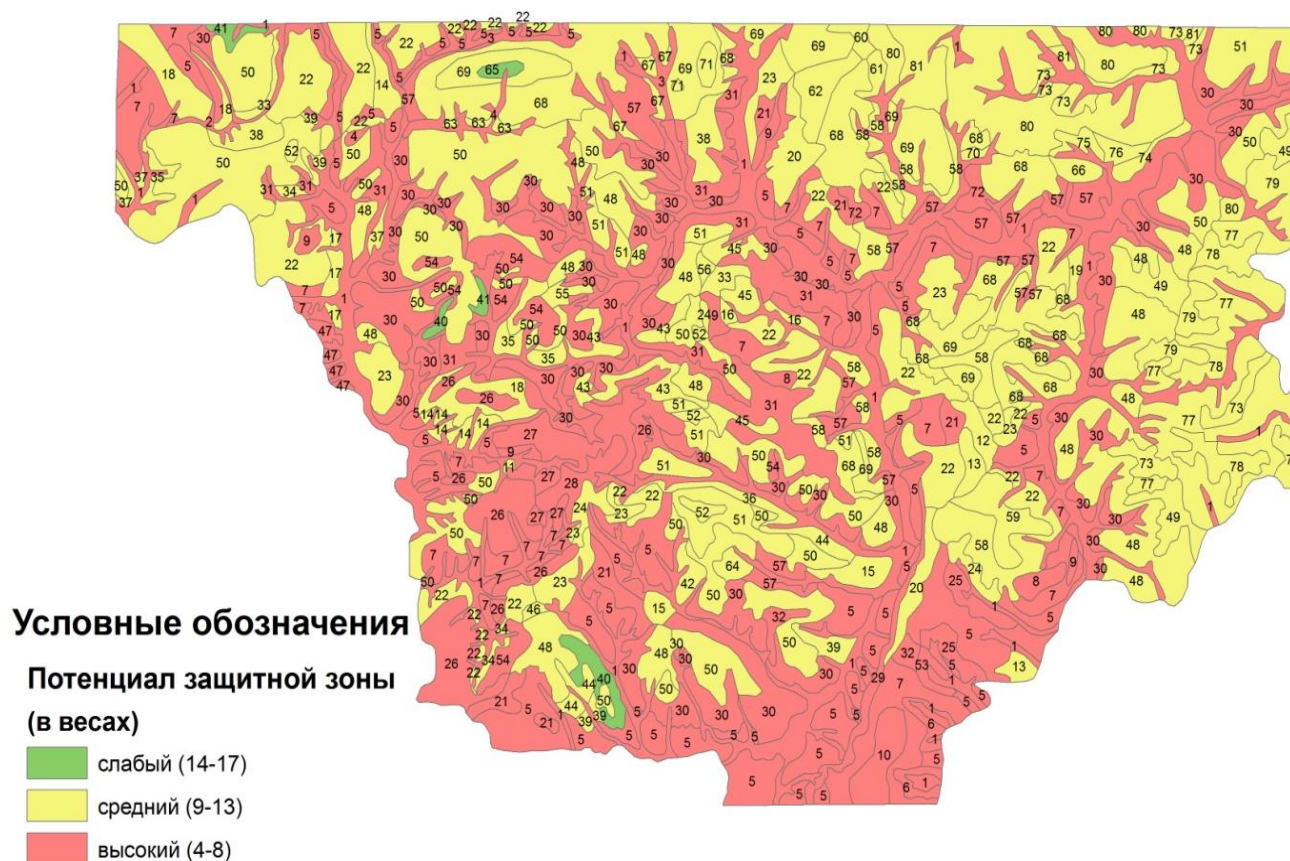


Рис. 10. Карта защитной зоны юга Калужской области (цифрами на карте обозначены номера типовых участков). **Fig. 10.** Map of the protected zone in the south of Kaluga Region (numbers indicate the typical sites).

Карта уязвимости грунтовых вод по ^{137}Cs строится на основе карты техногенной нагрузки по ^{137}Cs (распределение загрязнения поверхности земли ^{137}Cs) и карты защищенности грунтовых вод ^{137}Cs .

Районы, подверженные радиоактивному загрязнению, отражены на картах техногенной нагрузки по каждому радионуклиду. Карта техногенной радиоактивной нагрузки по Калужской области, построенная по материалам Росгидромета (Карта радиоактивного ..., 1995), показывает интенсивность загрязнения только по радионуклиду ^{137}Cs (данных по другим радионуклидам нет).

При установлении предельных уровней и фоновых концентраций по поверхностному загрязнению ^{137}Cs использованы данные, представленные в публикации «Критерии выбора площадок для строительства новых населенных пунктов для переселения людей в соответствии с государственной программой ликвидации в Белорусской ССР последствий аварии на Чернобыльской АЭС» (Материалы Чернобыльского форума ..., 2005). В качестве фоновой концентрации ^{137}Cs было принято значение $\leq 0.2 \text{ Ки/км}^2$, ПУ $\leq 1 \text{ Ки/км}^2$.

В связи с тем что в настоящее время не изучено влияние малых (меньше предельного уровня) концентраций радионуклидов на состояние окружающей среды, техногенная нагрузка (степень поверхностного радиоактивного загрязнения) рассматривалась только по отношению к предельному уровню.

Таблица 20. Экспликация к карте защитной зоны (Белоусова и др., 2018, с. 53).**Table 20.** Explication to the map of the protective zone (Белоусова и др., 2018, р. 53).

Тип и литологическое строение почв (вес)					Глубина залегания грунтовых вод (вес)
Аллювиальные, переслаивание песков, супесей, суглинков	Подзолистые			Лесные суглинистые	
	Песчаные	Супесчаные	Суглинки		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
1-2-4			47-4-8		0-1 (1)
2-2/4-8					
3-4/2-8					
4-4-6					
	5-2-6	35-2/4-11	57-2-8	73-2-9	1-3 (2)
	6-2-6	36-2/4-11	60-2/3-11	74-3-10	
	7-2-7	32-2/4-12	58-2-9	75-3-11	3-5 (3)
	8-2-7	37-2/4-12	59-2-9	76-3-11	
	9-2-8	33-2-9	62-2/3-13		5-10 (4)
	10-2-8				
	11-2/3-9	48-4-9	63-2/4-12	77-4-11	1-3 (2)
	12-2/4-10	49-4-9	64-2/4/1-12	77a-4-10	
	13-2/4-11	38-2/4-12	31-2/3-12	78-4-11	3-5 (3)
	14-2/4-13	45-2/5-13	66-3-10	79-4-12	
	15-2/5-11	39-2/4/2-13	67-4/2-12		1-3 (2)
	16-2/5-12	40-2/4/2-14		80-4-12	3-5 (3)
	17-4/2-10	41-2/4/2/1-14			1-3 (2)
	18-4/2-11	46-4/3-13	68-4-11	81-1-10	3-5 (3)
	19-4/2-11	50-4-10			
	20-4/3-13	51-4-11	69-4-12		5-10 (4)
	21-4-8	42-2/1/2-10			1-3 (2)
	22-4-9	54-1-7			3-5 (3)
	23-4-10		70-4-12		5-10 (4)
	24-4-11				10-25 (6)
	25-1-5	43-2/5-12			1-3 (2)
	26-1-6	56-5-11			3-5 (3)
	27-1-7				5-10 (4)
	28-1-8	34-2-10	71-4-13		10-15 (5)
	29-1-6				3-5 (3)
	30-2-5	44-2/5-12	72-1-7		1-3 (2)
	31-2-7				3-5 (3)
		52-4-12			10-15 (5)
		53-1-6			1-3 (1)
		55-5-10			1-3 (1)
			65-2/4/1-17		>15 (6)

Примечания к таблице 20: 21-4-8 – первая цифра обозначает номер типового участка, вторая – литологическое строение зоны аэрации (однослойные, суглинки), третья –

суммарное значение весов (баллов), состоящая из трех составляющих: тип и литологический состав почв, глубина залегания грунтовых вод и литологическое строение зоны аэрации; 39-2/4/2-13 – второе цифровое значение представляет трехслойное строение зоны аэрации (пески, суглинки, пески); есть и двухслойное и четырехслойное); весовые значения литологических разностей пород зоны аэрации: трепел, опоки, мел известняки – (1), пески – (2), супеси – (3), суглинки – (4), глины – (5); потенциал защитной зоны: слабый (4-8), средний (9-13), высокий (14-17).

Таблица 21. Характеристика пород и почв зон аэрации (Белоусова и др., 2018, с. 54).

Table 21. Characteristics of rocks and soils of aeration zones (Белоусова и др., 2018, p. 54).

Литологическое строение	Параметры					Инфильтрационное питание, W (м/сут)
	Коэффициент фильтрации, K_f (м/сут)	Естественная влажность, θ	Объемная масса скелета грунта, δ (кг/дм ³)	Коэффициент распределения, K_p (л/кг)		
				⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	
Почва						
Аллювиальная, переслаивание песков, супесей, суглинков	1.5	0.18	1.43	5	20	0.00027
Подзолистая + песчаная	1	0.18	1.53	3	20	
Подзолистая + супесчаная	0.1	0.18	1.6	3	30	
Подзолистая + суглинистая	$1.4 \cdot 10^{-3}$	0.2	1.6	3	30	
Лесная суглинистая	$3.9 \cdot 10^{-4}$	0.2	1.75	6	36	
Зона аэрации						
Пески	10	0.25	1.43	1	10	0.00027
Супеси	0.6	0.26	1.6	1	20	
Суглинки	0.007	0.26	1.63	6	26	
Глины	0.003	0.26	1.86	10	30	
Трепел и опоки	15	0.5	1.12	15	36	
Мел	15	0.5	1.12	15	36	

Выделены следующие категории уязвимости грунтовых вод по ¹³⁷Cs: катастрофически уязвимые, очень сильно уязвимые, сильно уязвимые, уязвимые, слабо уязвимые, условно неуязвимые, неуязвимые. Выделение последней категории условно, т.к. за счет движения фильтрационного потока из областей, где распространены уязвимые грунтовые воды, загрязнение может достигнуть и областей с первоначально неуязвимыми водами.

Достижение водоносного горизонта загрязненными инфильтрационными водами является важным показателем при оценке защищенности в случае, когда их концентрация в грунтовых водах превышает фоновую. Наличие техногенных радионуклидов в водоносном горизонте в количестве, превышающем фоновые концентрации, а в критических ситуациях и достигающие предельного уровня, подтверждает незащищенность грунтовых вод от

загрязнения данным радионуклидом. Интенсивность дальнейшего загрязнения водоносного горизонта будет зависеть от исходной концентрации радионуклида на поверхности почвы и времени его полного распада.

Таблица 22. Время проникновения радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в грунтовые воды.
Table 22. The penetration time of ^{90}Sr and ^{137}Cs radionuclides into groundwater.

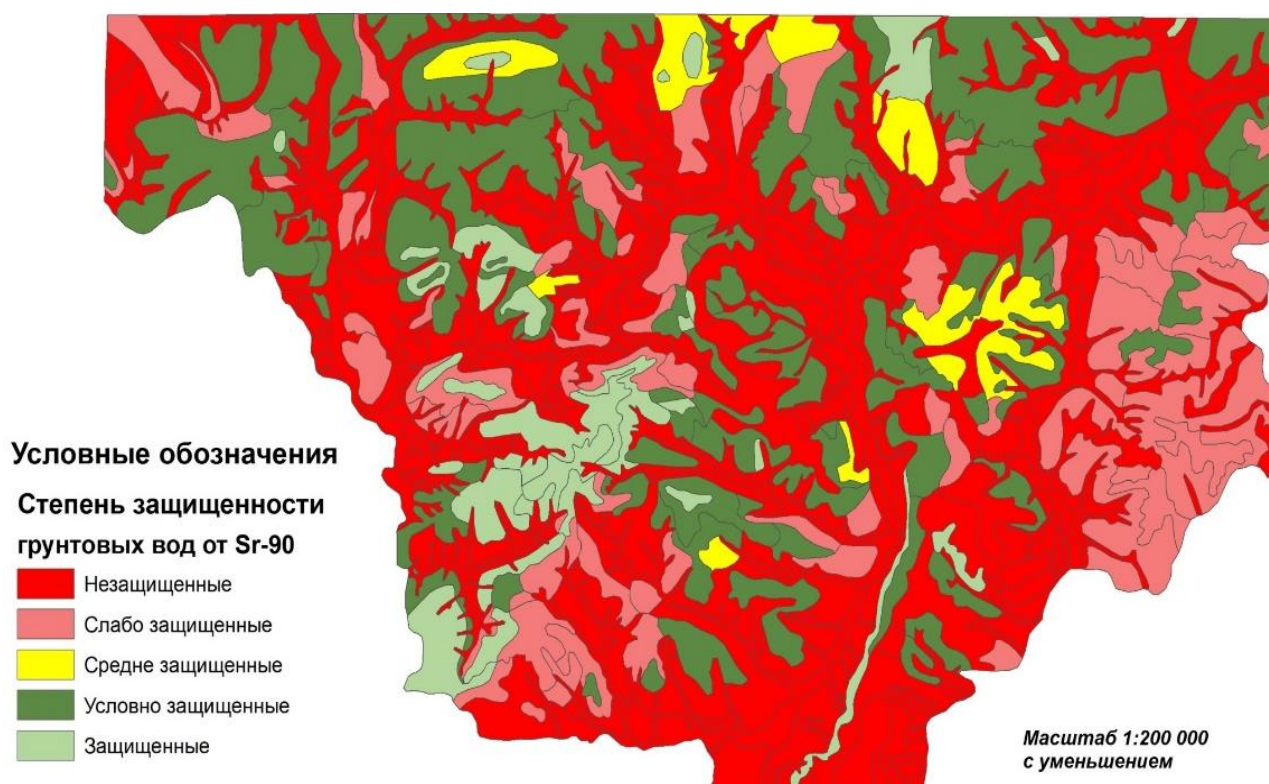
№ участка	Время t_3				
	t_3 (нейтр.) ЗВ (год)	Радионуклиды			
		t_3 ^{90}Sr (год)	Σt_3 $^{90}\text{Sr} + t_3$ (нейтр.) (год)	t_3 ^{137}Cs (год)	Σt_3 $^{137}\text{Cs} + t_3$ (нейтр.) (год)
1	0.01	3.70	3.71	21.30	21.31
2	0.05	8.50	8.55	40.10	40.15
3	0.05	8.49	8.54	40.06	40.11
4	0.07	10.35	10.42	43.99	44.06
5	0.40	8.21	8.61	76.50	76.90
6	0.40	8.21	8.61	76.50	76.90
7	0.07	15.51	15.58	149.01	149.08
8	0.07	15.51	15.58	149.01	149.08
9	0.14	28.16	28.30	275.99	276.13
10	0.14	28.16	28.30	275.99	276.13
11	0.07	8.74	8.81	119.81	119.88
12	0.23	28.20	28.43	144.45	144.68
13	0.48	57.60	58.08	292.50	292.98
14	0.27	34.70	34.97	195.50	195.77
15	0.34	49.10	49.44	176.30	176.64
16	0.72	101.80	102.52	359.80	360.52
17	0.23	102.29	102.52	144.45	144.68
18	0.48	33.10	33.58	292.50	292.98
19	0.48	33.10	33.58	292.50	292.98
20	0.27	109.76	110.03	717.62	717.89
21	0.42	48.10	48.52	212.43	212.85
22	0.87	99.70	100.58	436.05	436.93
23	0.30	35.22	35.52	156.53	156.83
24	3.98	420.67	424.65	1826.81	1830.79
25	0.12	155.10	155.22	379.40	379.52
26	0.25	325.60	788.5	325.85	788.75
27	0.48	623.90	624.38	1504.51	1504.99
28	1.13	1476.23	1477.39	3550.20	3551.33
29	0.25	325.60	325.85	788.50	788.75
30	0.04	8.21	8.25	76.50	76.55
31	0.08	15.50	15.58	149.00	149.08
32	0.08	15.54	15.62	155.40	155.48
33	0.15	28.23	28.38	282.34	282.49

Продолжение таблицы 22.

№ участка	Время t_3				
	t_3 (нейтр.) ЗВ (год)	Радионуклиды			
		t_3 ^{90}Sr (год)	Σt_3 $^{90}\text{Sr} + t_3$ (нейтр.) (год)	t_3 ^{137}Cs (год)	Σt_3 $^{137}\text{Cs} + t_3$ (нейтр.) (год)
34	0.24	46.40	46.64	463.73	463.97
35	0.23	28.24	28.47	150.81	151.04
36	0.23	28.24	28.47	150.81	151.04
37	0.48	57.70	58.18	298.90	299.38
38	0.48	57.70	58.18	298.90	299.38
39	0.17	21.60	21.77	128.15	128.32
40	0.36	44.70	45.06	257.20	257.56
41	0.1	29.76	29.86	138.85	138.95
42	0.07	57.20	57.27	183.8	183.87
43	0.3	49.11	49.41	176.32	176.62
44	0.3	49.20	49.50	182.70	183.00
45	0.63	101.90	102.53	366.2	366.83
46	0.55	58.80	59.35	390.4	390.95
47	0.20	22.40	22.60	106.98	107.18
48	0.40	48.20	48.60	218.80	219.2
49	0.40	48.20	48.60	218.80	219.2
50	0.88	99.80	100.68	442.40	443.28
51	1.70	190.11	191.81	833.74	835.44
52	2.80	319.10	321.90	1392.8	1395.6
53	0.13	155.20	155.33	385.75	385.88
54	0.26	325.65	325.91	794.9	795.16
55	0.6	90.10	90.70	282.52	283.12
56	1.20	188.20	189.40	210585.00	210586.20
57	0.08	8.60	8.68	86.00	86.08
58	0.12	15.85	15.97	158.55	158.67
59	0.12	15.85	15.97	158.55	158.67
60	0.12	9.13	9.25	129.30	129.42
61	0.19	16.98	17.17	250.03	250.22
62	0.31	30.30	30.61	455.22	455.53
63	0.27	28.56	28.89	153.98	154.25
64	0.24	70.87	71.11	232.20	232.54
65	1.62	573.33	574.95	1783.96	1785.58
66	0.26	18.11	18.37	341.50	341.76
67	0.27	28.56	28.89	153.98	154.25
68	0.92	100.12	101.04	445.6	446.52
69	0.58	61.40	61.98	277.9	277.48
70	1.72	190.40	192.12	836.91	838.63
71	2.90	319.44	322.34	1395.95	1398.24

Продолжение таблицы 22.

№ участка	Время t_3				
	t_3 (нейтр.) ЗВ (год)	Радионуклиды			
		t_3 ^{90}Sr (год)	Σt_3 $^{90}\text{Sr} + t_3$ (нейтр.) (год)	t_3 ^{137}Cs (год)	Σt_3 $^{137}\text{Cs} + t_3$ (нейтр.) (год)
72	0.165	155.5	155.665	388.92	389.09
73	0.11	10.80	10.91	90.90	91.01
74	0.17	11.90	12.07	177.50	177.67
75	0.28	20.30	20.58	346.4	346.68
76	0.39	28.70	29.09	515.2	515.59
77	0.49	50.70	51.19	226.8	227.19
77a	0.46	48.44	48.9	221.95	222.41
78	0.49	50.7	51.19	226.8	227.19
79	0.95	102.3	103.25	450.45	451.35
80	0.95	102.3	103.25	450.45	451.35
81	0.55	626.5	627.05	920.54	921.09

Рис. 11. Карта защищенности грунтовых вод от ^{90}Sr юга Калужской области.Fig. 11. Map of groundwater protection from ^{90}Sr in the south of Kaluga Region.

Рассмотренный подход к построению карт естественной защищенности грунтовых вод от радиоактивного загрязнения может быть использован при составлении аналогичных карт по оценке загрязнения высокотоксичными загрязняющими веществами.

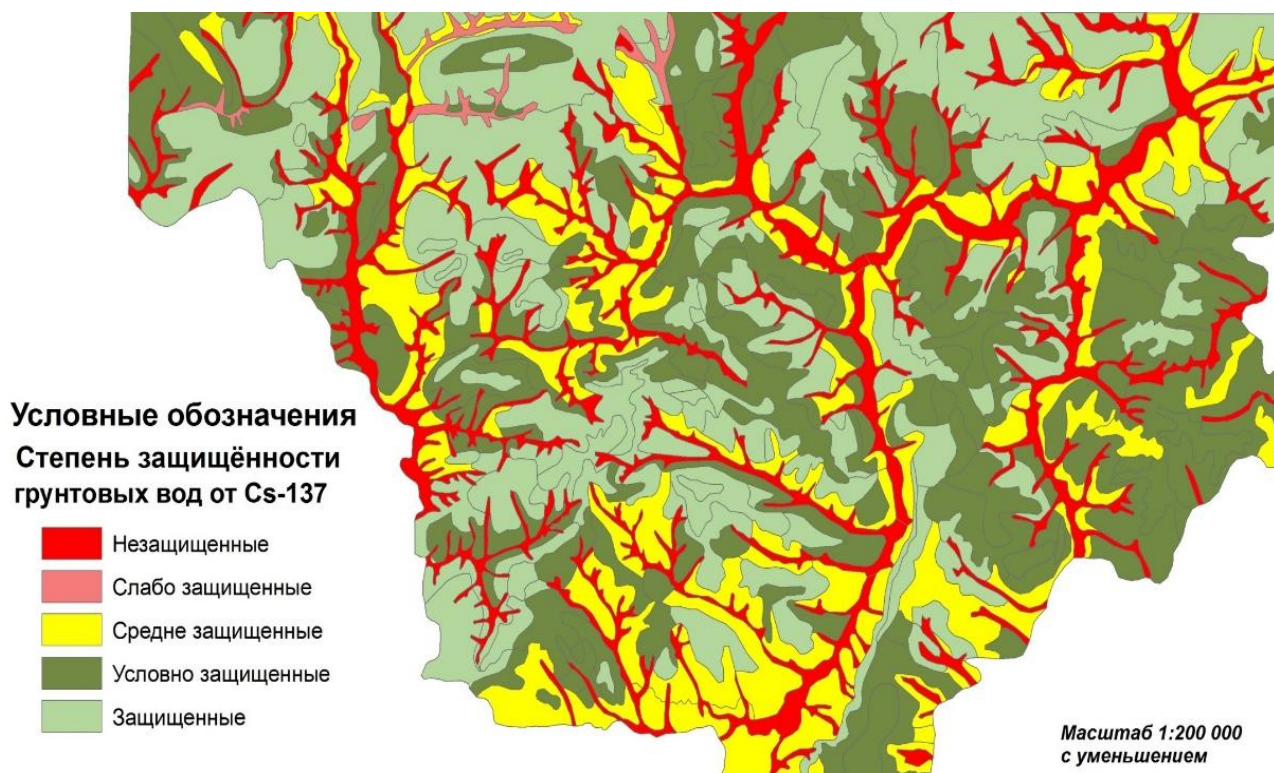


Рис. 12. Карта защищенности грунтовых вод от ^{137}Cs юга Калужской области.

Fig. 12. Map of the groundwater protection from ^{137}Cs in the south of Kaluga Region.

Результаты оценки уязвимости грунтовых вод к загрязнению радионуклидами на территории Калужской области

Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС. Для характеристики уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs была разработана категоризация степени уязвимости по соотношению техногенной нагрузки по ^{137}Cs к защищенности грунтовых вод от загрязнения (табл. 23, 24).

На рисунке 13 показана техногенная нагрузка (плотность поверхностного выпадения ^{137}Cs) после аварии. На рисунке 14 показана степень уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs в зоне радиоактивного следа сразу после аварии: очень сильно уязвимые сосредоточены на отдельных участках в среднем течении р. Рессета, сильно уязвимые – в долинах рек в центральной части следа, средне уязвимые – по долинам рек, притоков, оврагов и на востоке у р. Вытебеть, слабо уязвимые – по водоразделам рек, очень слабо уязвимые – по периферии следа, неуязвимые – на высоких террасах и частично на водоразделах рек.

Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 30 лет после аварии на ЧАЭС. Для оценки уязвимости активность поверхностных выпадений ^{137}Cs была уменьшена вдвое на карте техногенной нагрузки (рис. 15, табл. 25), т.к. один период полураспада уже миновал.

На карте уязвимости (рис. 16) на этот срок показано, что в зоне следа очень сильно уязвимых грунтовых вод уже нет, сильно уязвимые сохранились узкими полосами в долинах рек и вдоль русел, средне уязвимые – на низких террасах рек и значительно уменьшились по площади, площади слабо уязвимых, как и очень слабо уязвимых, увеличились, площади условно уязвимых и неуязвимых не изменились.

Таблица 23. Степень уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС (2-10 – весовые значения степени уязвимости; Белоусова, Руденко, 2019, с. 45).

Table 23. The degree of groundwater vulnerability to ^{137}Cs pollution after the Chernobyl Accident (2-10 are the weight values of the vulnerability rate; Белоусова, Руденко, 2019, p. 45).

Защищённость (вес)	Техногенная нагрузка Концентрация Cs^{137} (Ки/км ²) на поверхности земли (вес)						
	>10 (6)	8-10 (5)	6-8 (4)	4-6 (3)	2-4 (2)	1-2 (1)	<1 (0)
(4) Незащищённые $T_3 < 30$ лет	10	9	8	7	6	5	Условно уязвимые
(3) Слабо защищённые $30 < T_3 < 60$ лет	9	8	7	6	5	4	
(2) Средне защищённые $60 < T_3 < 100$ лет	8	7	6	5	4	3	
(1) Условно защищённые $100 < T_3 < 300$ лет	7	6	5	4	3	2	
(0) Защищённые $T_3 > 300$ лет	Неуязвимые						

Примечание к таблицам 23-27: степень уязвимости: неуязвимые – $T_3 > 300$ лет, условно уязвимые – <1 (вес), очень слабо уязвимые – 1-2, слабо уязвимые – 3-4, средне уязвимые – 5-6, сильно уязвимые – 7-8, очень сильно уязвимые – 9-10.

Таблица 24. Степени уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs .

Table 24. Degree of groundwater vulnerability to ^{137}Cs contamination.

Степень уязвимости	Вес	Цвет
Незагрязнённые		
Неуязвимые	$T_3 > 300$ лет	
Условно уязвимые	<1	
Очень слабо уязвимые	2-1	
Слабо уязвимые	4-3	
Средне уязвимые	6-5	
Сильно уязвимые	8-7	
Очень сильно уязвимые	10-9	

Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 60 лет после аварии на ЧАЭС. Для оценки уязвимости активность поверхностных выпадений ^{137}Cs была уменьшена вдвое (рис. 17, табл. 26) по сравнению с техногенной нагрузкой спустя 30 лет после аварии, поскольку прошёл ещё один период полураспада.

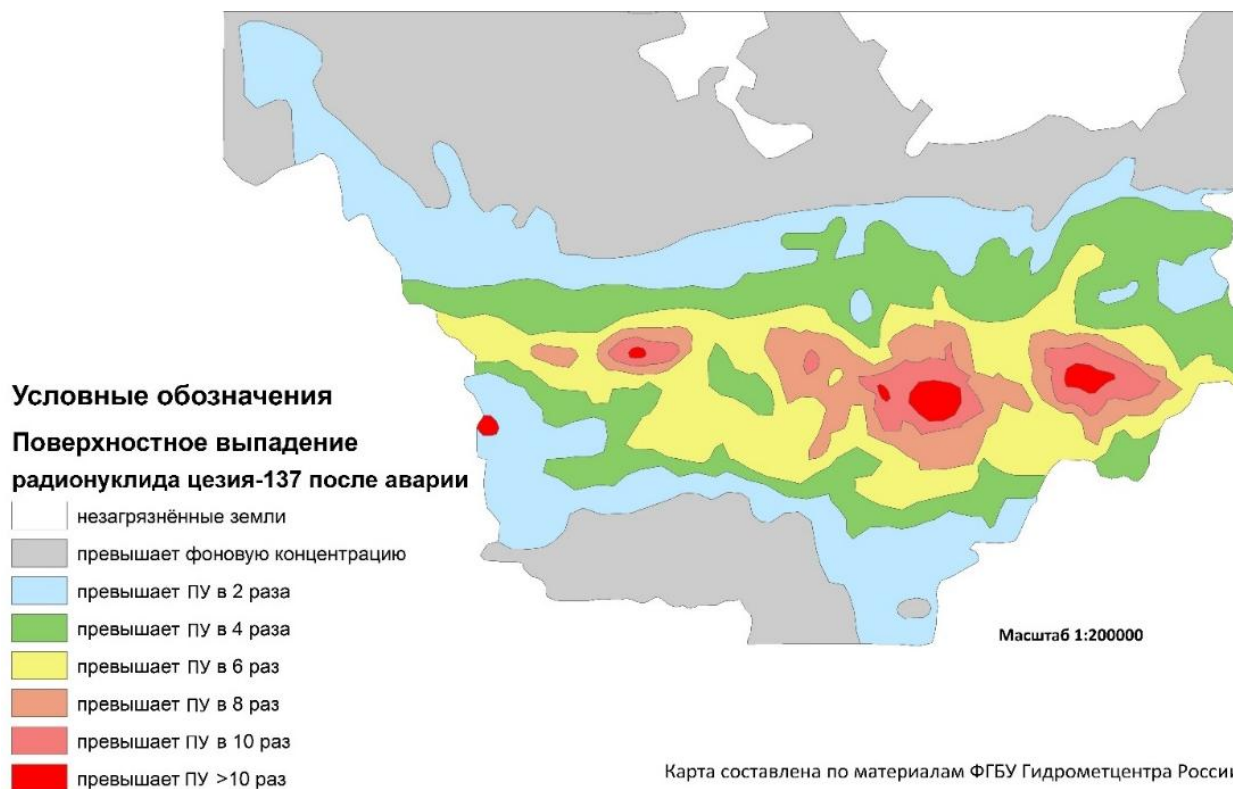


Рис. 13. Карта техногенной нагрузки (плотность поверхностного выпадения ^{137}Cs) после аварии на ЧАЭС. **Fig. 13.** Map of the technogenic load (density of surface ^{137}Cs deposition) after the Chernobyl Accident.

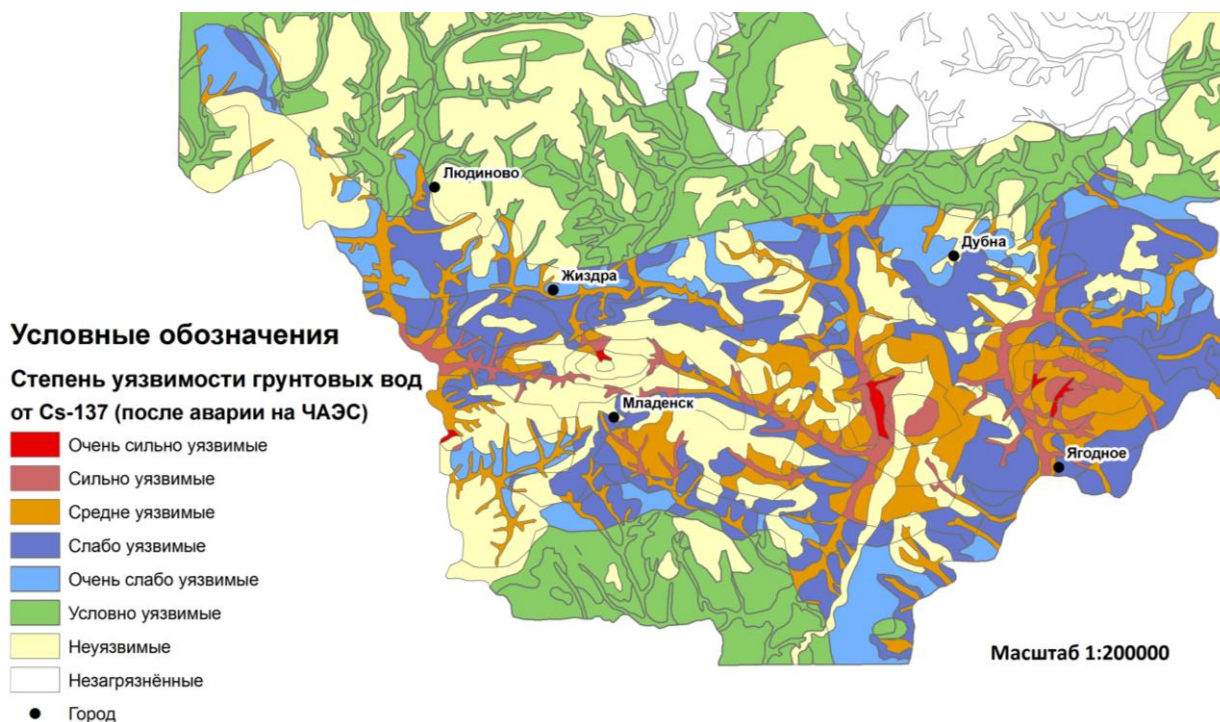


Рис. 14. Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС. **Fig. 14.** Map of groundwater vulnerability to ^{137}Cs pollution after the Chernobyl Accident.

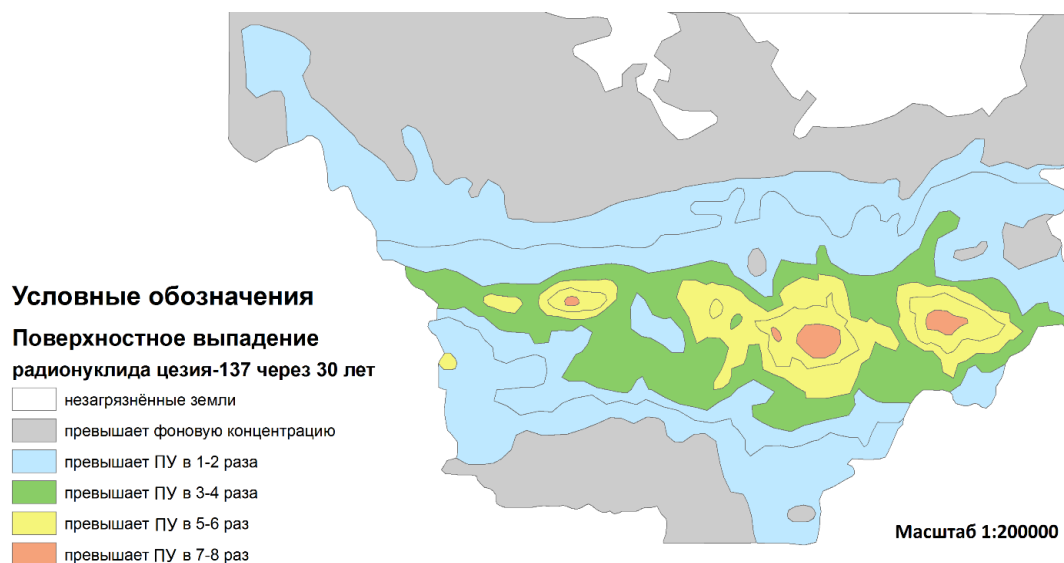


Рис. 15. Карта техногенной нагрузки (плотность поверхностного выпадения ¹³⁷Cs) спустя 30 лет после аварии на ЧАЭС. **Fig. 15.** Map of technogenic load (density of surface ¹³⁷Cs deposition) 30 years after the Chernobyl Accident.

Таблица 25. Степень уязвимости грунтовых вод к загрязнению ¹³⁷Cs спустя 30 лет после аварии на ЧАЭС (2-8 – весовые значения уязвимости; Белоусова, Руденко, 2019, с. 47).

Table 25. The degree of groundwater vulnerability to ¹³⁷Cs pollution 30 years after the Chernobyl Accident (2-8 are the weight values of vulnerability; Белоусова, Руденко, 2019, p. 47).

Защищённость (вес)	Техногенная нагрузка Концентрация Cs ¹³⁷ (Ки/км ²) на поверхности земли (вес)						
	>5 (4)	4-5 (4)	3-4 (3)	2-3 (2)	1-2 (1)	0.5-1	<1
(4) Незащищённые T ₃ <30 лет	8	8	7	6	5	Условно уязвимые	
(3) Слабо защищённые 30<T ₃ <60 лет	7	7	6	5	4		
(2) Средне защищённые 60<T ₃ <100 лет	6	6	5	4	3		
(1) Условно защищённые 100<T ₃ <300 лет	5	5	4	3	2		
(0) Защищённые T ₃ >300 лет	Неуязвимые						

Техногенная нагрузка распределяется следующим образом (рис. 17): в центральной части следа на трех участках будет превышать ПУ в 2-4 раза, по краям следа – в 1-2 раза, на остальной территории будет превышать фоновую.

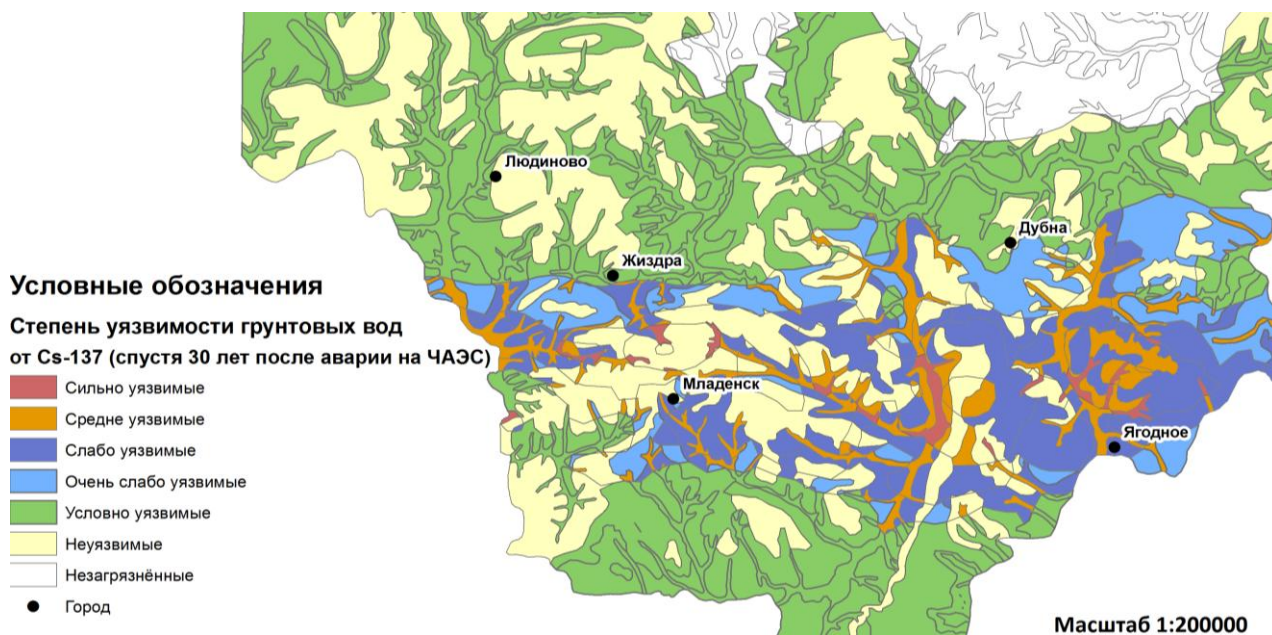


Рис. 16. Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 30 лет после аварии на ЧАЭС. **Fig. 16.** Map of groundwater vulnerability to ^{137}Cs pollution 30 years after the Chernobyl Accident.

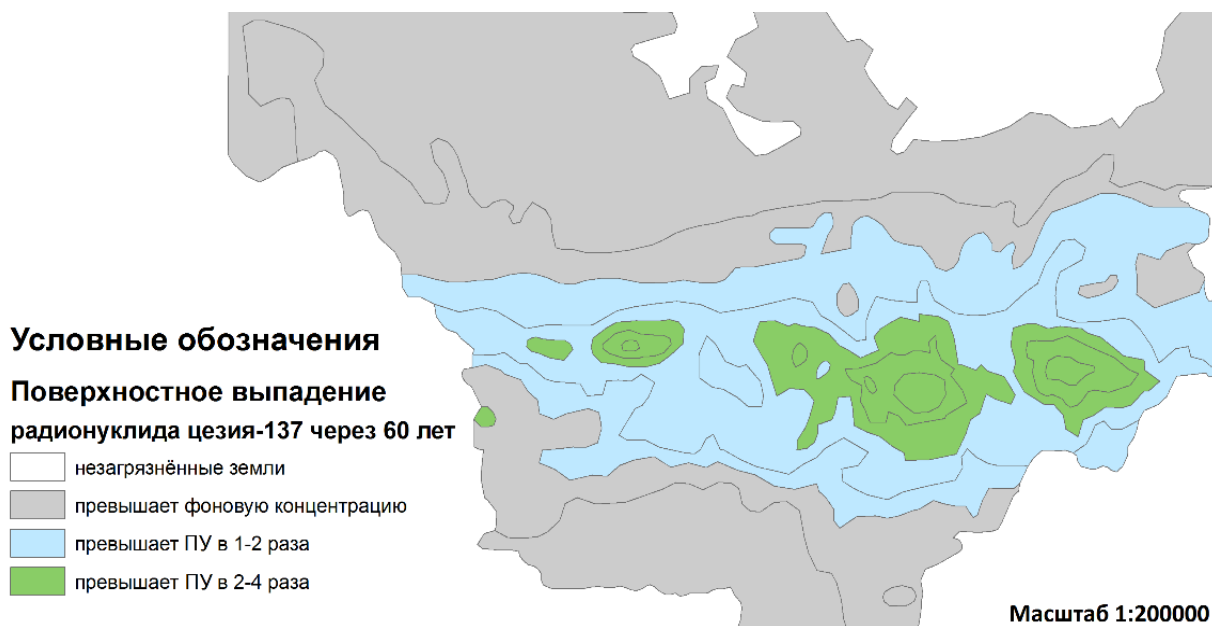


Рис. 17. Карта техногенной нагрузки (плотность поверхностного выпадения ^{137}Cs) спустя 60 лет после аварии на ЧАЭС. **Fig. 17.** Map of anthropogenic load (density of surface ^{137}Cs deposition) 60 years after the Chernobyl Accident.

Уязвимость грунтовых вод (рис. 18) к загрязнению ^{137}Cs изменяется следующим образом: сильно уязвимых и средне уязвимых уже не будет, слабо уязвимые сохранятся по долинам рек и притоков, очень слабо уязвимые – на водоразделах рек, на периферии следа в долинах рек будут присутствовать условно уязвимые грунтовые воды.

Таблица 26. Степень уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 60 лет после аварии на ЧАЭС (2-8 – весовые значения уязвимости). **Table 26.** The degree of groundwater vulnerability to ^{137}Cs pollution 60 years after the Chernobyl Accident (2-8 are the weight values of vulnerability).

Защищённость (вес)	Техногенная нагрузка Концентрация Cs^{137} ($\text{Ки}/\text{км}^2$) на поверхности земли (вес)						
	>2.5 (3)	2-2.5 (2)	1.5-2 (1)	1-1.5 (1)	0.5-1 (0)	0.25-0.5 (0)	<0.5 (0)
(4) Незащищённые $T_3 < 30$ лет	7	6	5	5	Условно уязвимые		
(3) Слабо защищённые $30 < T_3 < 60$ лет	6	5	4	4			
(2) Средне защищённые $60 < T_3 < 100$ лет	5	4	3	3			
(1) Условно защищённые $100 < T_3 < 300$ лет	4	3	2	2			
(0) Защищённые $T_3 > 300$ лет	Неуязвимые						

Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 90 лет после аварии на ЧАЭС. Для оценки уязвимости грунтовых вод спустя 3 периода полураспада активность поверхностных выпадений ^{137}Cs была уменьшена вдвое по сравнению с техногенной нагрузкой, которая наблюдалась через 60 лет после аварии (рис. 19, табл. 27).

Через 90 лет будет наблюдаться иная картина:

– техногенная нагрузка (рис. 19), превышающая ПУ в 1-2 раза, будет сосредоточена только на трех участках в центре радиоактивного следа, на остальной территории она превышает фоновые значения;

– уязвимость грунтовых вод (рис. 20) резко сократилась: в долинах рек она будет очень слабая, на водоразделах – условно уязвимая, на остальной территории – неуязвимая.

Такая тенденция изменения степени уязвимости грунтовых вод подтверждается также и данными мониторинга НПО «Тайфун» (Карта радиоактивного ..., 1995). На изучаемой территории, в состав которой входят Людиновский, Жиздринский, Хвастовичский и частично Думиничский и Ульяновский районы, на 2013 г. участки с загрязнением почв, превышающим 15 ПДК, отсутствуют, а участки с загрязнением от 5-15 ПДК присутствуют на территориях Жиздринского, Хвастовичского и Ульяновского районов.

Учитывая спрогнозированные изменения техногенной нагрузки на территории радиоактивного следа, можно говорить о том, что в интервале 100-120 лет активность первоначальных поверхностных выпадений ^{137}Cs снизится до значений ниже ПУ, но будет еще превышать фоновые значения, а полностью исчезнет через 300 лет после аварии.

В течение 100-120 лет после аварии на ЧАЭС в зоне радиоактивного следа могут быть обнаружены участки, на которых загрязнение грунтовых вод ^{137}Cs может превышать

фоновые концентрации.

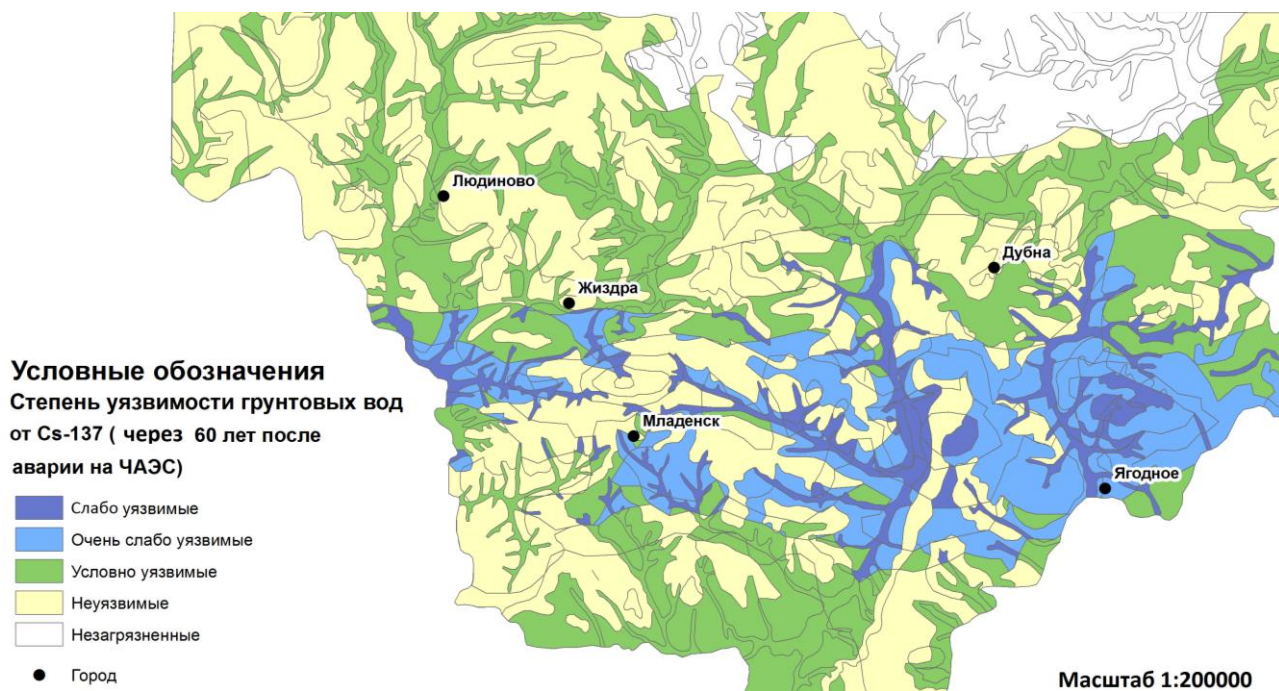


Рис. 18. Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 60 лет после аварии на ЧАЭС. **Fig. 18.** Map of groundwater vulnerability to ^{137}Cs pollution 60 years after the Chernobyl Accident.

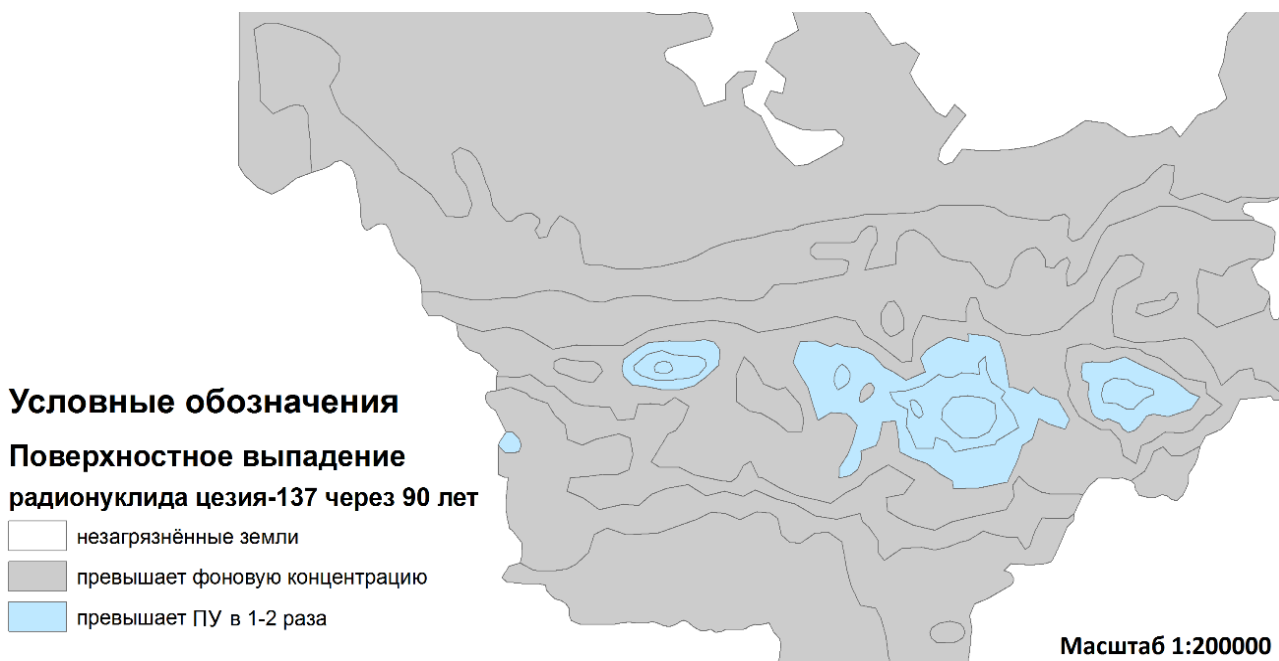


Рис. 19. Карта техногенной нагрузки (плотность поверхностного выпадения ^{137}Cs) спустя 90 лет после аварии на ЧАЭС. **Fig. 19.** Map of anthropogenic load (density of surface ^{137}Cs deposition) 90 years after the Chernobyl Accident.

Таблица 27. Степень уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 90 лет после аварии на ЧАЭС (2-8 – весовые значения уязвимости). **Table 27.** The degree of groundwater vulnerability to ^{137}Cs pollution 90 years after the Chernobyl Accident (2-8 are the weight values of vulnerability).

Защищённость (вес)	Техногенная нагрузка Концентрация Cs^{137} (Ки/км ²) на поверхности земли (вес)					
	>1.25 (1)	1-1.25 (1)	0.75-1 (0)	0.5-0.75 (0)	0.25-0.5 (0)	0.125-0.25 (0)
(4) Незащищённые $T_3 < 30$ лет	5	5	Условно уязвимые			
(3) Слабо защищённые $30 < T_3 < 60$ лет	4	4				
(2) Средне защищённые $60 < T_3 < 100$ лет	3	3				
(1) Условно защищённые $100 < T_3 < 300$ лет	2	2				
(0) Защищённые $T_3 > 300$ лет	Неуязвимые					

Выводы

Вопреки многочисленным новостям о снижении атомных мощностей, в странах Европы и Северной Америки намечается тенденция развития атомной промышленности, о чем свидетельствуют доклады на многочисленных конференциях. Сторонники этой идеи указывают на важность роли, которую атомная энергетика играет в решении проблемы изменения климата. По имеющимся на конец 2019 года данным, в 31 стране работают 192 АЭС с общим числом энергоблоков равным 438. Взамен существующим энергоблокам, ресурс которых скоро будет исчерпан, строятся новые энергоблоки с усовершенствованными типами реакторов и системами безопасности. На данный момент у 55 блоков в мире имеется статус «строящихся». Такие данные приводятся в базе PRIS (Power Reactor Information System, 2020), поддерживаемой МАГАТЭ. Теперь в России база PRIS учитывает 36 действующих блоков (пятый показатель в мире) и шесть строящихся.

Длительный мониторинг работы существующих атомных станций показал, что с экологической и экономической точек зрения при квалифицированном обслуживании, работая в штатном режиме, атомная станция практически не оказывает негативного воздействия на окружающую среду, позволяет снабжать необходимой энергией регионы долгие годы без дополнительных затрат на топливо, способствует экономическому росту и научному развитию региона.

Следует понимать, что в окружающей среде существуют радионуклиды природного происхождения, обуславливающие естественный радиационный фон, а деятельность АЭС и иных предприятий, использующих энергию делящихся атомов, приносит дополнительное

количество изотопов, порой отсутствующих в природе. В ходе деятельности предприятий РОСАТОМа в окружающую среду в виде выбросов попадают более 50 различных радиоактивных изотопов, а в виде сбросов сточных вод – более 20, период полураспада которых варьирует от нескольких минут или часов ($T_{1/2}^{132}\text{I}=2.3\text{ ч}$) до нескольких миллионов или миллиардов лет ($T_{1/2}^{238}\text{U}=4.47\cdot 10^9\text{ лет}$, $T_{1/2}^{239}\text{Pu}=2.41\cdot 10^4$).

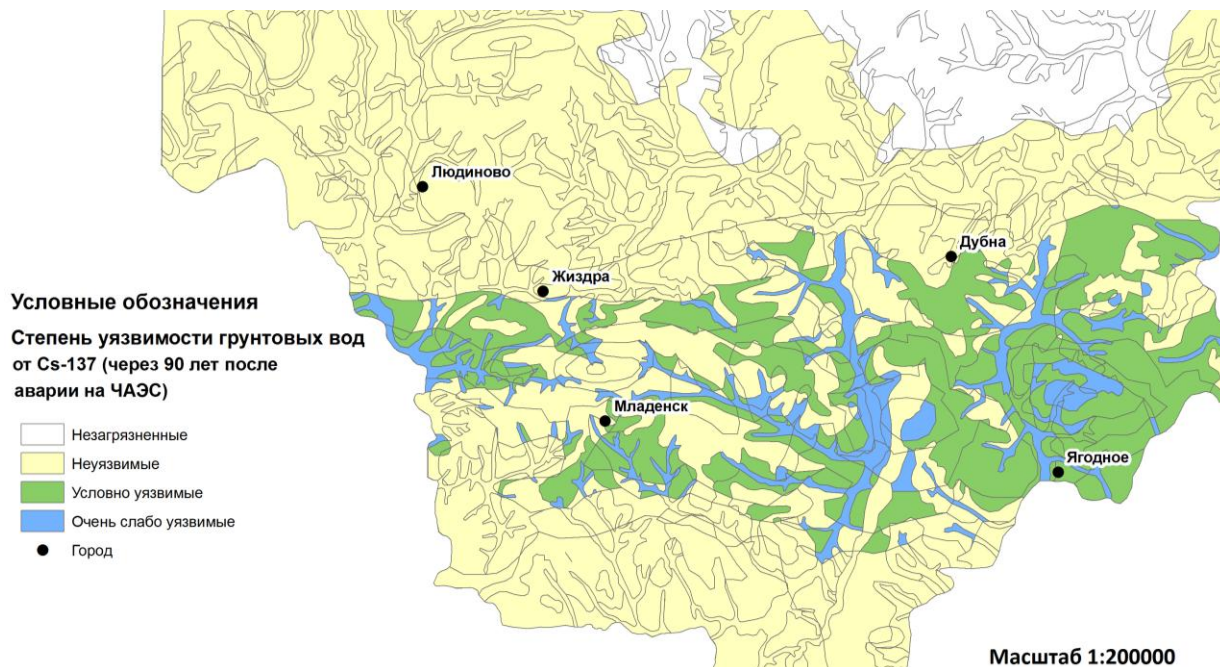


Рис. 20. Карта уязвимости грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs спустя 90 лет после аварии на ЧАЭС. **Fig. 20.** Map of groundwater vulnerability to ^{137}Cs pollution 90 years after the Chernobyl Accident.

В рамках реализации радиационного мониторинга каждой АЭС на территории России в зоне наблюдения и санитарно-защитной зоне ежегодно отбираются пробы для определения объемной активности аэрозолей, активности радиоактивных выпадений, содержания радионуклидов в воде открытых водоемов, донных отложениях и рыбе открытых водоемов, объемной активности радионуклидов в воде контрольных скважин, содержания радионуклидов в почве, продуктах питания местного производства, мощность AMBIENTного эквивалента дозы внешнего γ -излучения на контрольных пунктах. Современные системы контроля позволяют своевременно регистрировать поступающие в окружающую среду радионуклиды. По данным многолетних наблюдений, суммарная активность газоаэрозольных выбросов и сбросов невелика. Многоуровневые системы очистки позволяют добиться показателей ниже допустимых нормативами, а местами и ниже пределов обнаружения. Анализ влияния деятельности АЭС показывает, что на период работы их в штатном режиме не представляет опасности для здоровья населения. Наибольший вклад в суммарную активность выбросов на проанализированных АЭС вносят тритий и инертные радиоактивные газы, а сбросов – тритий, однако зарегистрированные значения ниже допустимых нормативов. В сравнении с 2017 годом наблюдаются небольшие изменения в контролируемых величинах, как в сторону увеличения, так и уменьшения.

Помимо АЭС в регионах присутствует ряд радиационно опасных объектов промышленного, инженерно-конструкторского и научно-исследовательского характера. Часто они становятся источниками выбросов радионуклидов, и по причине их нахождения

непосредственно в городах они могут оказывать негативное влияние на население. Например, присутствие радиоактивного йода в приземном слое атмосферы г. Обнинска обусловлено работой научно-исследовательского института, расположенного в городе – филиалом НИФХИ. В 2018 году в приземном слое атмосферы г. Обнинска было зарегистрировано 130 случаев появления ^{131}I , что является самым большим количеством случаев за все время наблюдения. В Калужской области отдельные РОО оказывают влияние на загрязнение атмосферы ^{137}Cs , ^{90}Sr и изотопами плутония, суммарные показатели активностей которых оказываются выше фоновых. Однако, как показывают данные, регистрируемое радиоактивное загрязнение окружающей среды техногенными радионуклидами не превышает установленных нормативов.

Говоря о сравнительно небольшом количестве отходов атомной энергетики по сравнению с иными областями энергетики, следует помнить о потенциальной опасности, которая заключается в возможности выброса огромного количества чрезвычайно опасных компонентов во время технического сбоя или аварии. Каждая авария или инцидент на РОО привносит в окружающую среду ряд радионуклидов, опасность которых будет сохраняться достаточно длительное время. Последствия аварии на ЧАЭС в 1986 г. привели к крупномасштабному радиоактивному загрязнению многих субъектов ЦФО на территориях Белгородской, Брянской, Воронежской, Калужской, Курской, Липецкой, Орловской, Рязанской и Тульской областей. До сих пор в этих регионах остаются территории, которые носят различный социальный статус: зона отчуждения, зона отселения, зона с правом на отселение, зона с льготным социально-экономическим статусом. Загрязнение окружающей среды проявляется в повышенной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , отдельные почвы нуждаются в проведении защитных реабилитационных мероприятий. Например, в Брянской области до настоящего времени сохраняются территории с уровнями загрязнения почвы ^{137}Cs более 40 Ки/км². Самый высокий уровень содержания ^{137}Cs в почве (плотность загрязнения) зафиксирован в Новозыбковском районе, где он составляет 344.3 кБк/м².

Анализ полученных результатов радиологического обследования показывает, что очищение почв (перевод) из разряда загрязненных (свыше 37 кБк/м²) в «чистые» (до 37 кБк/м²) на территории ЦФО составляет всего 254.1 тыс. га (18.7%), в том числе по юго-западным районам – 101.4 тыс. га (22.0%).

Ежегодные исследования территорий, расположенных в зоне радиоактивного следа выявляют превышения гигиенических нормативов в местной сельскохозяйственной продукции, лесных ягодах, грибах, молоке. Норматив по содержанию ^{137}Cs в грибах – 500 Бк/кг, сухих грибах – 2500 Бк/кг, в лесных ягодах – 160 Бк/кг. Например, в Калужской области в 2018 году было обнаружено превышение гигиенических нормативов в 1 пробе – в ягодах черники, собранных вблизи д. Акимовка Жиздринского района. Наибольшие максимальные уровни содержания ^{137}Cs зарегистрированы в Брянской области в грибах в Новозыбковском районе – 11100 Бк/кг, в сухих грибах в Злынковском районе – 29820 Бк/кг, в лесных ягодах (чернике) в Климовском районе – 2315 Бк/кг. Однако удельный вес количества проб (данные по Брянской области) с превышением гигиенических нормативов ежегодно снижается и в 2018 году составил 3.6%, что ниже на 1.0%, чем в 2017 году, и на 1.5% ниже, чем в 2016 году. В 2018 году в Брянской области зарегистрировано превышение допустимых уровней в 6 пробах молока из личного подсобного хозяйства.

В рамках подготовки данной статьи был проведён анализ многочисленных работ ученых и научных коллективов, занимающихся проблемами радиационного мониторинга, учтен опыт авторов публикации за период более чем 30 лет, что позволило по усовершенствованной авторской методике произвести оценку и картографирование защищенности грунтовых вод от радиоактивного загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr и уязвимости к загрязнению ^{137}Cs территории, попавшей в зону радиоактивного следа. В ходе анализа и

обработки данных ряда карт (почвенной, глубин залегания грунтовых вод и литологического строения зоны аэрации) были использованы специально разработанные градации для каждого из компонентов, которые позволили прийти к безразмерным величинам и получить сопоставимые результаты.

Как показали исследования, наиболее опасным для загрязнения грунтовых вод является ^{90}Sr , который более интенсивно мигрирует в них с поверхности земли. Карты защищенности грунтовых вод от загрязнения радионуклидами позволяют давать предварительную прогнозную оценку развития ситуации на многие годы вперед.

Проведена оценка и картографирование уязвимости грунтовых вод к радиоактивному загрязнению ^{137}Cs на момент аварии на ЧАЭС и спустя 30, 60 и 90 лет после аварии. В зоне радиоактивного следа сразу после аварии на ЧАЭС очень сильно уязвимые грунтовые воды были сосредоточены на отдельных участках в среднем течении реки Ресета, сильно уязвимые – в долинах рек в центральной части следа, средне уязвимые – по долинам рек, притоков, оврагов и на востоке у реки Вытебеть, слабо уязвимые – по водоразделам рек, очень слабо уязвимые – по периферии следа, неуязвимые – на высоких террасах рек и частично на водоразделах рек.

Спустя 30 лет очень сильно уязвимых грунтовых вод в зоне следа уже не осталось, сильно уязвимые сохранились узкими полосами в долинах рек и вдоль русел, средне уязвимые – на низких террасах и значительно уменьшились по площади, площади слабо уязвимых грунтовых вод увеличились, как и очень слабо уязвимых, площади условно уязвимых и неуязвимых не изменились.

Уязвимость грунтовых вод через 60 лет изменялась следующим образом: сильно уязвимых и средне уязвимых грунтовых вод к загрязнению ^{137}Cs не осталось, сохранились слабо уязвимые по долинам рек и притоков, очень слабо уязвимые – на водоразделах, а условно уязвимые присутствуют на периферии следа в долинах рек.

Через 90 лет после аварии уязвимость грунтовых вод резко сократилась: в долинах рек она сильно ослабела, уязвимые наблюдаются на водоразделах условно, на остальной территории остались только неуязвимые грунтовые воды.

Таким образом, прослеживая в целом тенденцию изменения техногенной нагрузки на территории радиоактивного следа, можно сделать вывод, что в интервале 100-120 лет активность первоначальных поверхностных выпадений ^{137}Cs снизится до значений ниже предельного уровня, но будет еще превышать фоновые значения, а полностью исчезнет через 300 лет после аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексахин Р.М.* 1992. Миграция радионуклидов в агроценозах // Проблемы радиохимии и космохимии. С. 179-205.
- Антоненко Г.И., Моисеев И.Т., Рерих Л.А., Тихомиров Ф.А.* 1994. Радиозэкологические аспекты почвенной химии и агрохимии ^{137}Cs // Экология регионов атомных станций / Ред. Ю.А. Егоров. № 1. М. С. 255-261.
- Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 2 августа 2019 года; ред. от 1 января 2020 года). 2006 [Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/901982862> (дата обращения 17.01.2020)].
- Белоусова А.П.* 2001. Качество подземных вод. Современные подходы к оценке. М.: Наука. 340 с.
- Белоусова А.П.* 2003. Основные принципы и рекомендации по оценке и картированию защищенности подземных вод от загрязнения // Водные ресурсы. Т. 30. № 6. С. 677-677.
- Белоусова А.П.* 2005. Ресурсы подземных вод и их защищенность от загрязнения в бассейне реки Днепр и отдельных его областях: Российская территория. М.: ЛЕНАНД. 168 с.
- Белоусова А.П.* 2012. Оценка защищенности подземных вод от загрязнения радионуклидами.

// Вода: химия, экология. № 5. С. 11-17.

- Белоусова А.П.* 2015. Мониторинг подземных вод в районах расположения АЭС // Разведка и охрана недр. № 4. С. 65-71.
- Белоусова А.П.* 2017. Особенности мониторинга подземных вод в районах расположения АЭС // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. № 3 (111). С. 64-77.
- Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В.* 2006. Экологическая гидрогеология. М.: ИКЦ «Академкнига». С. 397.
- Белоусова А.П., Галактионова О.В.* 1994. К методике оценки естественной защищенности подземных вод от радиоактивного загрязнения // Водные ресурсы. Т. 21. № 3. С. 340-345.
- Белоусова А.П., Захарова Т.В., Швец В.М.* 1992. Мониторинг гидросферы в районах расположения АЭС // Водные ресурсы. № 3. С. 127-134.
- Белоусова А.П., Миняева Ю.В., Руденко Е.Э.* 2019. Методы оценки защищенности и уязвимости подземных вод к загрязнению в регионах со сложной экологической ситуацией // Экосистемы: экология и динамика. Т. 3. № 2. С. 99-128.
- Белоусова А.П., Руденко Е.Э.* 2019. Эколого-гидрогеологические исследования на территориях европейской части России, пострадавших от аварии на ЧАЭС // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. № 4 (136). С. 38-56.
- Белоусова А.П., Руденко Е.Э., Миняева Ю.В.* 2018. Опыт усовершенствования методики оценки защищенности подземных вод от загрязнения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. № 4 (124). С. 42-56.
- Биндеман Н.Н.* 1963. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. М.: Госгеотехиздат. 203 с.
- Бурнадян А.И.* 1990. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана. М.: Атомэнергоиздат. 81 с.
- Государственная геологическая карта СССР (четвертичных отложений). 1976-1980. Серия Московская. Масштаб 1:200000. М.: Министерство геологии СССР. Лист N-36-XXIV.
- Государственная гидрогеологическая карта СССР. 1972-1976. Серия Московская. Масштаб 1:200000. Л.: Министерство геологии СССР. Лист N-36-XXIV.
- Государственная почвенная карта СССР. 1953. Масштаб 1:1000000. М.: АН СССР, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Главное управление геодезии и картографии МВД СССР. Листы N-36, N-37.
- Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2018 году. 2019. Официальный портал органов власти Калужской области. Калуга. 292 с. [Электронный ресурс <https://admoblkaluga.ru/sub/ecology/OOC/> (дата обращения 12.01.2020)].
- Зекцер И.С., Белоусова А.П.* 1990. Отчет об оценке естественной защищенности грунтовых вод и зоны аэрации от радиоактивного загрязнения в Калужской области и общие рекомендации по организации мониторинга. М.: АН СССР, Институт водных проблем. 205 с.
- Изотопы в гидросфере. 1989 // Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума. Каунас, 29 мая – 1 июня 1989 г. М. С. 336.
- Карта радиоактивного загрязнения Европейской части и Уральского региона России цезием-137 по состоянию на январь 1993 года. 1995. Масштаб 1:500000 / Ред. Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. М.: Росгидромет, ИГКЭ, ИПГ, НПО «Тайфун», ВНИСХМ, ГМП «Рамон», ГНТП «Аэрогеофизика», Невскгеология, ГПП «Севзапгеология», ПГО «Казгеофизика». 22 с.
- Колобов Е.М., Хитров Л.М.* 1990. Ландшафтно-геохимические исследования миграции радионуклидом Чернобыльского происхождения // Геохимия. № 10. С. 1379-1519.
- Коноплев А.В., Борзилов В.А., Бобовникова Ц.И.* 1988. Распределение радионуклидов, выпавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС в системе «почва-вода» // Метеорология и гидрология. № 12. С. 63-74.

- Корпорация CNNC приняла участие в 62-ой сессии генеральной конференции МАГАТЭ в Вене, 2018, SinoAtom. 2018 [Электронный ресурс <http://sinoatom.ru/?p=939> (дата обращения 17.10.2019)].
- Круглов С.В., Алексахин Р.М., Васильева Н.А., Куринов А.Д., Ратников А.Н.* 1990. О формировании радионуклидного состава почв в зоне аварии Чернобыльской АЭС // Почвоведение. №10. С. 26-34.
- Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Каткова М.Н., Санина К.Д., Скакунова М.А., Вережанская К.В.* 2014. Методика оценки радиационных рисков на основе данных мониторинга радиационной обстановки. Росгидромет: Рекомендации Р.52.18.787-2013. Обнинск. 108 с.
- Кудельский А.В., Пашкевич В.И., Петрович А.А., Жукова О.М.* 1997. Радионуклиды чернобыльского происхождения в речном стоке Беларуси // Водные ресурсы. Т. 24. № 3. С. 304-310.
- Кудияров С.* 2018. Атомный экспорт, специальный доклад // Эксперт-Online. № 39 (1090) [Электронный ресурс <https://expert.ru/expert/2018/39/atomnyij-eksport> (дата обращения 22.02.2020)].
- Левинзон С.В.* 2018. Энергоресурсы: прогнозы и реальность. М.: Академия Естествознания. 408 с. [Электронный ресурс <https://monographies.ru/ru/book/view?id=778> (дата обращения 20.12.2019)].
- Левкина Г.В., Иванченкова О.А., Луцевич А.А.* 2019. Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2018 году «Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области» / Ред. С.В. Мотылев. 266 с.
- Малюгина Л.Н., Кулешова Р.И.* 1981. Государственная гидрогеологическая карта СССР. Масштаб 1:200000. Серия Московская. Материалы отчета ПГО «Центргеология». Листы 36-IV, XII; 37-VII, I.
- Материалы Чернобыльского форума «Наследие Чернобыля: медицинские, экологические и социально-экономические последствия и рекомендации правительствам Беларуси, Российской Федерации и Украины». 2005 // Радиация и риск. Специальный выпуск 2 [Электронный ресурс <https://cyberleninka.ru/article/n/nasledie-chernobylya-meditsinskie-ekologicheskie-i-sotsialno-ekonomicheskie-posledstviya-i-rekomendatsii-pravitelstvami-belarusi/viewer> (дата обращения 18.12.2019)].
- Мельникова Л.П., Ильина О.И.* 1982. Гидрогеологические и инженерно-геологические карты южной части Московской синеклизы масштаба 1:500000. Отчет ПГО «Центргеология». 170 с.
- Мотыляев А.* 2014. Уран: факты и фактики // Химия и жизнь. № 8 [Электронный ресурс https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/432441/Uran_fakty_i_faktiki (дата обращения 12.01.2020)].
- Общая информация о Курской АЭС. 2019. Росэнергоатом [Электронный ресурс https://rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-kurskoj-aes/ (дата обращения 20.02.2020)].
- Объяснительная записка к гидрогеологической и инженерно-геологической картам западной части Московской синеклизы масштаба 1:500000. 1979. Отчет ПГО «Центргеология». 15 с.
- Оценка и прогноз качества воды в районах, пораженных в результате Чернобыльской аварии (Брянская область) (1997-2001 гг.). 2001. Окончательный отчет по проекту. М.: ПРООН. 123 с.
- Павлоцкая Ф.И.* 1992. Геомиграция искусственных радионуклидов // Проблемы радиогеохимии и космохимии. М.: Наука. С. 148-171.
- Постановление Правительства Российской Федерации от 08.10.2015 № 1074 «Об утверждении перечня населённых пунктов, находящихся в границах зон радиоактивного загрязнения вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС». 2015 [Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/420307886> (дата обращения 17.12.2019)].

- Пристер Б.С., Омельченко И.П., Перепелятникова А.В.* 1990. Миграция радионуклидов в почве и переход их в растения в зоне аварии Чернобыльской АЭС // Почвоведение. № 10. С. 51-60.
- Проблемы радиогеохимии и космохимии. 1992 / Ред. Ю.А. Шуколюков. М.: Наука. 320 с.
- Прохоров В.М.* 1981. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах. Физико-химические механизмы и моделирование. М.: Энергоиздат. 98 с.
- Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. 2019. Обнинск: ФГБУ НПО «Тайфун». 324 с.
- СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. 2009 [Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/902170553> (дата обращения 30.11.2019)].
- СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. 2001 [Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/901806306> (дата обращения 30.11.2019)].
- Семенютин А.И., Пристер Б.С., Перепелятникова А.В.* 1989. Особенности вертикального распределения цезия-137 в почвах зоны Чернобыльской АЭС. Тезисы Всесоюзного совещания. Суздаль, 13-17 ноября 1989 г. М. С. 84-85.
- Сколько атомных станций работает в мире и в России? Атомэнергомаш. 2006 [Электронный ресурс <http://www.aem-group.ru/mediacenter/informatoriya/skolko-atomnyix-stanczij-rabotaet-v-mire-i-v-rossii.html> (дата обращения 18.02.2020)].
- СТО 1.1.1.04.001.0143-2015. Положение о годовых отчетах по оценке состояния безопасной эксплуатации энергоблоков атомных станций. 2015 [Электронный ресурс <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293733/4293733549.pdf> (дата обращения 21.01.2020)].
- Яковлев Е.А.* 1988. Радиоизотопный контроль за состоянием подземных вод в районах размещения атомноэнергетических объектов // Исследование гидрогеологических и инженерно-геологических объектов геофизическими и изотопными методами. Киев: Мингео УССР. С. 237-242.
- Яхрюшин В.Н.* 2018. Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240/ Ред. С.М. Вакуловский. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун». 238 с.
- Федеральный закон Российской Федерации «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ. Статья 1. 2002 [Электронный ресурс http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/ (дата обращения 15.10.2019)].
- 1400 метров под землей. Как работает полигон глубинного захоронения Калининской АЭС. 2018. Атомная энергия 2.0 [Электронный ресурс <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2018/02/02/82976> (дата обращения 18.02.2020)].
- FORATOM Announces Priorities for 2019: Climate Change, Sustainability and Jobs. FORATOM. 2019 [Электронный ресурс <https://www.foratom.org/press-release/foratom-announces-priorities-for-2019-climate-change-sustainability-and-jobs/> (дата обращения 17.10.2019)].
- Power Reactor Information System. 2020 [Электронный ресурс <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx> (дата обращения 09.11.2019)].

UDC: 556.383/388:504(571.1)

**TRANSFORMATION OF VULNERABILITY OF GROUNDWATER TO RADIOACTIVE
POLLUTION IN THE CHERNOBYL TRACK ZONE
IN THE TERRITORY OF KALUGA REGION**

© 2020. A.P. Belousova, E.E. Rudenko

*Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences
Russia, 119333, Moscow, Gubkina Str. 3. E-mail: anabel@iwp.ru, belanna47@mail.ru*

Received February 03, 2019. Revised February 27, 2019. Accepted March 01, 2019.

We took the annual data on radiation monitoring, provided by the “Tayfun” Science and Production Association (Радиационная обстановка ..., 2019), and regional state reports (Левкина и др., 2019; Доклад о состоянии ..., 2019) to make a detailed analysis of the radiation situation in Russia and some of its regions. As part of the analysis we assessed the problems and prospects of nuclear energy in the country and abroad. We analyzed the monitoring of the radiation situation in the said territory by the example of the Central Federal District. It included the monitoring structure of the nuclear plants (by the example of the Kalinin, Kursk, Smolensk and Novovonezh stations) and monitoring of the radiation situation in the territories located in the radioactive trail from the Chernobyl Accident in Kaluga and Bryansk Regions.

In 2018 the impact of nuclear power plants on the radioactivity of environmental objects was low. It is under strict control and was expressed in an increased tritium content, increased regional level of ^{137}Cs volume activity, and the presence of technogenic radionuclides, such as ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{95}Zr , ^{95}Nb , and ^{131}I in the environment, which are absent in the global background radiation. Volumetric activities of the controlled radionuclides are significantly lower than the admissible values of the radiation standards NRB-99/2009 (СанПиН ..., 2009) and do not threaten public health. However, the consequences of technogenic contamination of the environment with radionuclides after the Chernobyl Accident are still severe. It is manifested in the increased total radioactivity of surface and underground waters, soils and vegetation. And some territories require rehabilitation measures. Therefore, the monitoring researches in the area of the Chernobyl radioactive trail are relevant and necessary for a more accurate understanding of changes in groundwater radiation pollution.

The characteristics of the hydrogeological conditions showed that they are distinguished by a wide variety of aquifers, both pressure and non-pressure. Generally, the hydrogeological structure of the territory reminds a “layered cake”. The non-pressure aquifers include the waters of the Quaternary (alluvial, glacial, fluvio-glacial, marsh, and proluvial horizons), Cretaceous and Jurassic sediments. All those aquifers are related and do not have sustained water confines within their stratum, or complex. The pressure groundwater aquifers of fresh groundwater include many related Carboniferous aquifers. The Upper Jurassic confining area lies between those two strata, separating them. The aquifers of the Devonian, Proterozoic and Archean ages contain saline groundwater and brines and lie below the Carboniferous aquifers.

To assess groundwater protection and vulnerability to pollution, we used our original methodology. Its key definitions are as follows.

A *protection zone* separates groundwater from the surface pollution, and has a two-level structure: soils and rocks of the aeration zone.

Security is an ability of the protection zone to prevent pollution from penetrating the groundwater for a certain period of time.

Groundwater *vulnerability* to pollution is the ratio between the real technogenic load of the study area and the natural protection of groundwater. A substance is considered a pollutant if its concentrations exceed the background values. Therefore, when assessing security, we took into account the structural features of the protection zone separating groundwater from surface pollution, and the processes occurring under the influence of pollution.

When assessing security, we built a set of medium-scale maps (1:200000), for them to be the most appropriate for the possibilities of qualitative and quantitative assessments.

The map of the protection zone was obtained by combining a soil map, showing the structure of the first level of the zone, and the maps characterizing the structure of its second level (depths and lithological structure of the aeration zone). Typical sections were marked on the map, characterized by a certain structure of the first and second levels and groundwater depth. Their description is given in the map legend.

When assessing the possibility of groundwater contamination with radionuclides, the following factors were taken into account: sorption properties that ensure the retention of radionuclides by soils and rocks of the aeration zone; limitation of the traffic intensity (up to its complete retention) with an infiltration flow to groundwater; migratory properties of soils and rocks of the aeration zone, depending on the physicommechanical, water-physical and filtration properties and their mineralogical composition, and characterizing the movement intensity of the polluted infiltrating waters front deeper into the aeration zone right to groundwater; filtration (infiltration) path, i.e. the power of the aeration zone or groundwater depth; half-life of radionuclides.

Groundwater protection from any pollutant depends on the time the contaminated infiltration water front needs to reach the aquifer. The time it took for the radionuclides to dissolve in the soil and rocks of the aeration zone to fill their sorption capacity and then reach the groundwater, was determined by the proposed mathematical expression.

Essentially, the allocation of categories according to the proposed time for the pollutant to move through the protection zone, is an approximate predictive estimate of the process of groundwater pollution by radionuclides.

The maps of groundwater protection from ^{90}Sr and ^{137}Cs were based on the map of the protection zone. A comparison of the maps shows that ^{90}Sr is most dangerous for groundwater, since it can cover large areas of the aquifer in a short period (less than 5 years).

The map of groundwater protection from ^{90}Sr shows that about 50% of the territory is not protected from it, 20% is poorly protected, another 20% is conditionally protected, mainly in the north, and 5% is protected and moderately protected groundwater.

It is a completely different situation with ^{137}Cs contamination. The unprotected groundwater can be found only along the narrow strip along the riverbeds, poorly protected – in the valleys of several small rivers in the northwest, moderately protected – in the high river terraces, conditionally protected adjust to the watersheds, protected and conditionally protected are prevailing.

Thus, an estimation of the time that radionuclides need to travel through the protection zone allows us to make an approximate prediction of the process of groundwater contamination with that extremely dangerous pollutant.

The map of groundwater vulnerability to ^{137}Cs is based on the ^{137}Cs technogenic load map (^{137}Cs surface distribution) and the ^{137}Cs groundwater protection map. We assessed and mapped the groundwater vulnerability to ^{137}Cs contamination as it was at the time of the Chernobyl Accident, then 30 years after, as well as 60 and 90 years after.

According to the step-by-step assessment of soil vulnerability to pollution, a general tendency is observed in the changes of the technogenic load in the territory of the radioactive trail. It can be concluded that in the interval of 100-120 years the activity of the initial ^{137}Cs surface deposition will decrease to the values below the limits, but will still exceed the background values, and will completely disappear 300 years after the accident.

Within the 100-120 years after the Chernobyl Accident, the areas with ^{137}Cs groundwater pollution exceeding the background concentrations can still be detected in the radioactive trail zone.

Keywords: radiation situation, monitoring, radionuclides, groundwater protection and vulnerability, pollution sources, technogenic load.

DOI: 10.24411/2542-2006-2020-10053