

УДК 539.163:546.11.027:574.64

ТРИТИЙ В ВОДНОЙ СИСТЕМЕ ПОЙМЫ РЕКИ ПЫШМА

© 2023 г. М. Я. Чеботина^{1,*}¹ Институт экологии растений и животных, Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

*e-mail: Chebotina@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 01.10.2021 г.

После доработки 16.05.2022 г.

Принята к публикации 09.11.2022 г.

Представлены данные о концентрациях трития в воде р. Пышма, находящейся под воздействием Белоярской АЭС им. Курчатова, и питьевой воде населенных пунктов, расположенных в пойме реки. Установлено, что содержание радионуклида в воде реки на расстоянии до 400 км ниже плотины Белоярского водохранилища варьирует в пределах 13–26 Бк/л и достоверно снижается по течению реки. В пойменной части реки надфоновое тритиевое загрязнение поступает в питьевую воду колодцев и скважин. Концентрация радионуклида в воде колодцев изменяется от 8 до 19 Бк/л, достоверно снижаясь с увеличением их глубины и расстояния до плотины водоема-охладителя. Содержание трития в воде скважин, имеющих глубину от 4 до 80 м, практически не зависит от расстояния. В воде личных скважин выявлена тенденция к снижению содержания радионуклида с увеличением глубины источника. Уровни концентраций трития в родниковой воде семи населенных пунктов, расположенных по р. Пышма на разном расстоянии от плотины Белоярского водохранилища, почти в 2 раза выше, чем в воде глубинных скважин, имеют близкие значения и не зависят от расстояния.

Ключевые слова: тритий, Белоярская АЭС, р. Пышма, населенные пункты, колодцы, скважины, родники, сетевая вода

DOI: 10.31857/S0869803123010058, **EDN:** JWNХЕС

В связи с развитием атомной энергетики особую роль приобретают вопросы, связанные с воздействием предприятий ядерного цикла на окружающую среду. Дополнительное поступление радионуклидов в экосистемы, расположенные в непосредственной близости от таких предприятий, даже при штатном режиме работы, может приводить к загрязнению воздушной и водной среды и соответствующему радиоактивному загрязнению прилегающих территорий. Радиоэкологические исследования в таких регионах должны проводиться с учетом требований радиационного экологического мониторинга, цель которого — комплексная оценка состояния природных экосистем, находящихся в зоне воздействия атомных предприятий. Такая оценка необходима для прогноза радиоэкологических последствий воздействия этих предприятий на среду обитания человека и радиоэкологического нормирования [1–6].

Белоярская АЭС, как и любая другая атомная электростанция, является потенциальным источником загрязнения радионуклидами окружающей среды. За время существования на станции было сооружено четыре энергоблока. Первые два с водографитовыми канальными реакторами АМБ-100 и АМБ-200 функционировали соответ-

ственно в 1964–1981 и 1967–1989 гг. и были остановлены в связи с выработкой ресурса. Два действующих энергоблока (3-й и 4-й) с реакторами на быстрых нейтронах (БН-600 и БН-800) введены в эксплуатацию соответственно в 1980 и 2014 г.

Слаборadioактивные стоки станции, в том числе тритий, поступающие в Белоярское водохранилище и Ольховскую болотно-речную экосистему, в конечном итоге попадают в р. Пышма, которая является важной водной артерией на территории Свердловской и Тюменской областей. Истоком реки является оз. Ключевское, расположенное на массиве Молебского болота вблизи г. В. Пышма. Протяженность реки — 626 км, площадь водосбора — 19.4 тыс. км². Река пересекает с запада на восток обширную зауральскую лесостепь и впадает в р. Тура. Берега р. Пышма в верхнем ее течении покрыты лесом, хотя встречаются и заболоченные участки. В среднем течении они преимущественно скалистые, а в нижнем течении преобладает открытая местность. Река сильно петляет, встречаются старицы. Скорость течения в межень составляет 0.5–0.7 м/с. Ширина реки в верховье 8–10 м, ближе к устью — 60–100 м.

Начиная с 1980 г. в Институте экологии растений и животных УрО РАН проводится мониторинг поступления трития от Белоярской АЭС в водную экосистему водоема-охладителя и прилегающих территорий, в том числе в р. Пышма. Результаты этих исследований опубликованы в работах [6–8]. В процессе проведения исследований установлены уровни концентраций трития в воде разных зон Белоярского водохранилища в зависимости от времени наблюдений и периодов работы энергоблоков АЭС. При этом показано, что при систематическом сбросе в водоем-охладитель трития в течение длительного периода времени радионуклид в надфоновых концентрациях распространяется в природной среде не только через поверхностный сток и путем испарения с водной поверхности, но и путем диффузии в глубинные слои подстилающих пород с последующей пространственной миграцией на прилегающие территории, в том числе в источники питьевого водоснабжения [9].

Цель работы — исследовать уровни содержания трития в воде р. Пышма и различных источников питьевого водоснабжения в населенных пунктах поймы реки до пуска 4-го энергоблока БАЭС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Материалом исследования служила вода р. Пышма на всем ее протяжении от плотины, через которую она поступает из Белоярского водохранилища, до устья реки. Кроме того, были рассмотрены различные типы питьевой воды в населенных пунктах, расположенных в пойменной зоне реки (колодцы, скважины, родники, сетевая вода колонок). Отбор проб воды производили в июле 2013 г. в следующих пунктах наблюдений (в скобках приведено расстояние данного пункта до плотины Белоярского водохранилища, км): Боярка (1.4), Курманка (3.0), Гагарка (3.8), Белоярский (7.7), Крутиха (10.6), Ялунино (17.5), Малиновка (32.7), Белокаменный (45.7), Светлое (60.8), Знаменское (76.6), Сухой Лог (82.8), Новопышминское (99), Камышлов (145), Пышма (195), Никольское (160), Талица (232), Винзили (400).

Воду в каждом населенном пункте отбирали в двух повторностях по 0.5 л каждая. Из реки и родников воду отбирали из поверхностного слоя воды на глубину ~ 0–10 см, а из личных скважин и колодцев — с помощью насоса или ведра. Информацию о глубине указанных источников получали от их владельцев. Сетевую воду отбирали из водопроводных колонок, расположенных на территории населенных пунктов. Сведения о глубине скважин, из которых сетевая вода поступает в колонки, при возможности получали в администрации населенного пункта. Воду отбирали в

стеклянные бутылки, которые плотно закрывали пробками и транспортировали в Отдел континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Заречный). В процессе анализа воду фильтровали через бумажный фильтр “синяя лента”, дистиллировали и хранили в холодильнике. Для количественного определения трития в пробах воды проводили предварительное обогащение методом одноступенчатого электролиза. Метод основан на значительной разнице в скорости выделения легкого (протия) и тяжелых (дейтерия и трития) изотопов водорода при разрядке ионов на катоде в ходе электролитического разложения воды. Обогащение производили с помощью специально сконструированной электролитической установки. Детальная информация о ее устройстве, методике работы и расчетах концентраций трития приведена в монографии [7]. Просчет проб производили на установке “Дельта-300” (Россия). Для оценки надежности результатов неоднократно производили сверку методов, применяемых в Институте экологии растений и животных УрО РАН и других научных организациях. Полученные результаты свидетельствуют о хорошей сходимости методов.

Статистическую обработку данных проводили с использованием компьютерной программы Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вода р. Пышма. На рис. 1 показаны уровни концентраций трития в воде р. Пышма на расстоянии до 400 км от плотины Белоярского водохранилища. На момент исследования содержание радионуклида в речной воде варьировало от 13 до 26 Бк/л при среднем значении 20 ± 2 Бк/л. При этом все уровни концентраций трития от 3 до 5 раз превышали уровень техногенного фона по тритию для Уральского региона — 5 Бк/л [7]. Содержание трития в воде р. Пышма достоверно снижалось по мере удаления от плотины ($KK = -0.71$; $p = 0.033$).

Колодцы. Согласно проведенным исследованиям, содержание радионуклида в воде колодцев в населенных пунктах, расположенных в пойменной части р. Пышма, варьировало в пределах от 8 до 19 Бк/л при среднем значении 13 ± 1 Бк/л. Концентрация радионуклида достоверно снижалась с увеличением расстояния населенных пунктов до плотины Белоярского водохранилища ($KK = -0.80$; $p = 0.033$) (рис. 2). Глубина колодцев варьировала от 2 до 8 м. Анализ результатов исследования показал, что для всей совокупности данных по колодцам концентрация трития достоверно снижалась с увеличением их глубины ($KK = 0.67$; $p = 0.065$) (рис. 3). На всем протяжении реки это снижение составляло ~2 раза — от 19 до 8 Бк/л.

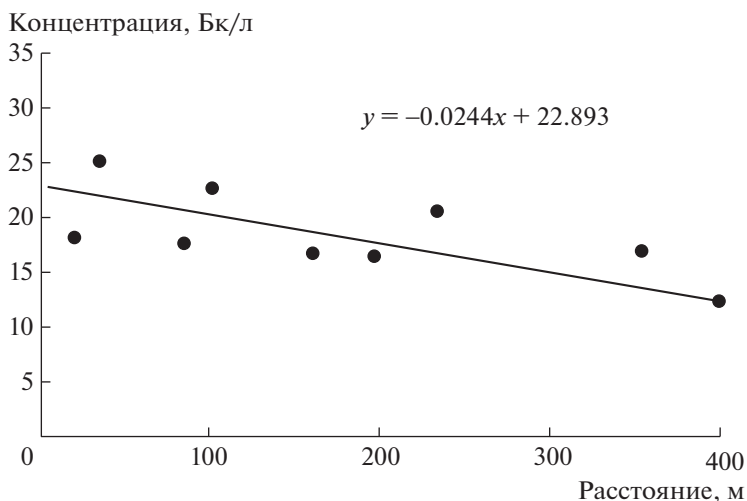


Рис. 1. Концентрации трития в воде р. Пышма на разном расстоянии от плотины водоема-охладителя, Бк/л.

Fig. 1. Tritium concentration in the water of the Pyshma river at different distances from the dam of the cooling reservoir, Bq/l.

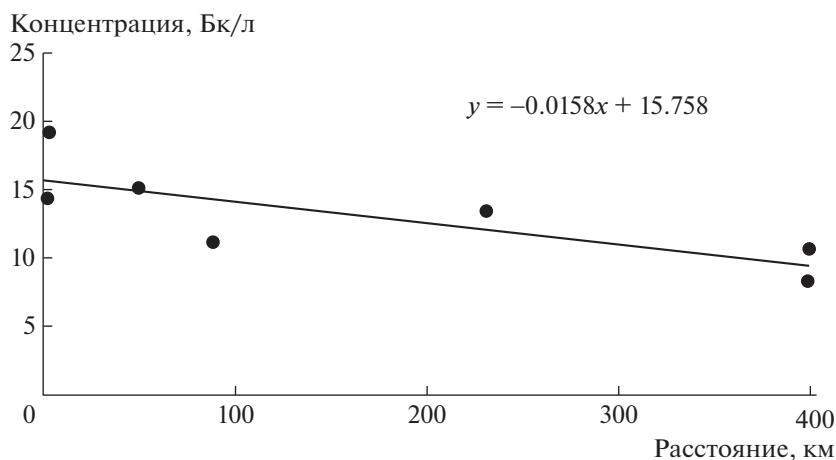


Рис. 2. Средние концентрации трития в воде колодцев населенных пунктов поймы р. Пышма на разном расстоянии от плотины Белоярского водохранилища, Бк/л.

Fig. 2. The average concentrations of tritium in the water of wells of the settlements in the floodplain of the Pyshma river at different distances from the dam of the Beloyarsk reservoir, Bq/l.

Скважины. Были исследованы личные скважины жителей пойменной части р. Пышма в пределах глубин от 4 до 47 м. Как видно из рис. 4, содержание радионуклида в скважинной воде изменялось от 4 до 20 Бк/л при среднем значении 12 ± 1 Бк/л. В целом на всем протяжении реки содержание трития в воде скважин не зависело от расстояния ($p > 0.05$), хотя в непосредственной близости от Белоярского водохранилища, на расстоянии 3–5 км от плотины, наблюдались заметные колебания концентраций радионуклида в скважинной воде. Последнее, возможно, связано с тем, что в этом районе, наряду с илстыми и песчано-илстыми грунтами, встречается скальный грунт, препятствующий проникновению

сбросной воды в водоносные горизонты. Анализ концентраций трития в зависимости от глубины скважин не выявил достоверных различий между ними в населенных пунктах на всем протяжении реки ($p > 0.05$) (рис. 5).

Сетевая вода. В табл. 1 представлены результаты исследования уровней концентраций радионуклида в сетевой воде, поступающей в водопроводные колонки населенных пунктов. Как правило, в них подается вода из специальных глубинных скважин. К сожалению, глубину таких скважин удалось установить только для двух населенных пунктов. Оказалось, что для большинства населенных пунктов уровни концентрации трития в сетевой воде имеют близкие значения

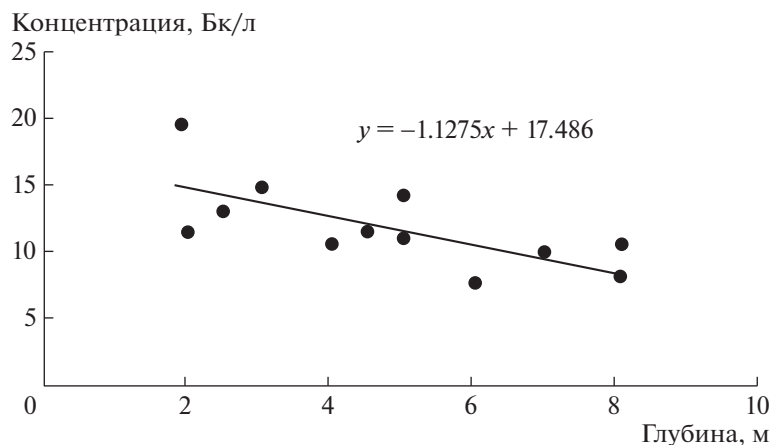


Рис. 3. Зависимость концентраций трития в воде колодцев в населенных пунктах по р. Пышма от глубины источника, Бк/л.

Fig. 3. The dependence of tritium concentrations in the water of wells in settlements along the Pyshma river from the depth of the source, Bq/l.

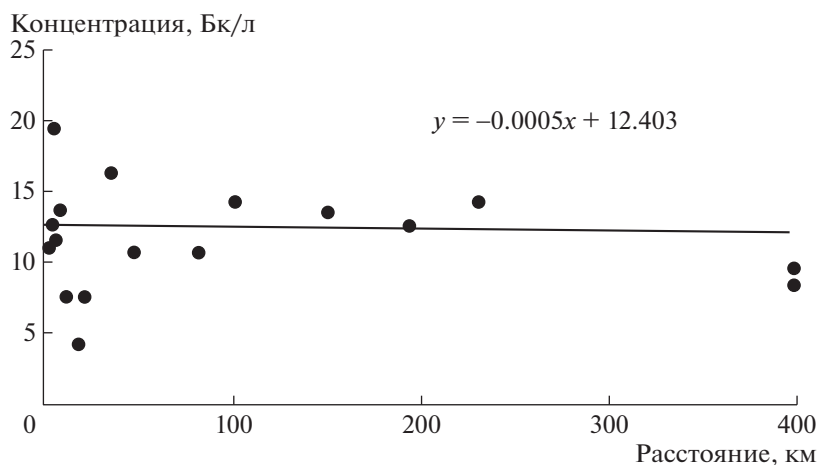


Рис. 4. Уровни концентраций трития в воде личных скважин жителей населенных пунктов в пойменной зоне р. Пышма на разном расстоянии от плотины Белоярского водохранилища, Бк/л.

Fig. 4. The levels of tritium concentrations in the water of personal wells of residents of settlements in the floodplain zone of the Pyshma river at different distances from the dam of the Beloyarsk reservoir, Bq/l.

(12–18 Бк/л) и практически не зависят от расстояния населенного пункта до водоема-охладителя. Только для двух пунктов наблюдений (Знаменский и Сухой Лог) отмечены пониженные значения концентраций трития в сетевой воде, которые приближаются к уровню техногенного фона. Указанные пункты сравнительно близко расположены друг от друга (~5–6 км). Можно предполагать, что они обеспечиваются водой из одного источника, имеющего меньшую концентрацию трития.

Родниковая вода. Уровни концентраций трития в родниковой воде семи населенных пунктов, расположенных по р. Пышма на разном расстоянии от плотины Белоярского водохранилища,

имеют близкие значения и практически не зависят от расстояния (табл. 2). В среднем они почти в 2 раза выше, чем соответствующие концентрации радионуклида в сетевой воде.

ОБСУЖДЕНИЕ

Обращаясь к истории вопроса об исследовании поступления тритиевого загрязнения от БАЭС в р. Пышма, следует отметить, что первые радиоэкологические исследования реки начались в 1980 г., когда работали три энергоблока. В период совместной работы 1-го и 2-го энергоблоков (1981 г.) и 2-го и 3-го энергоблоков (до 1989 г.) через плотину Белоярского водохранилища в

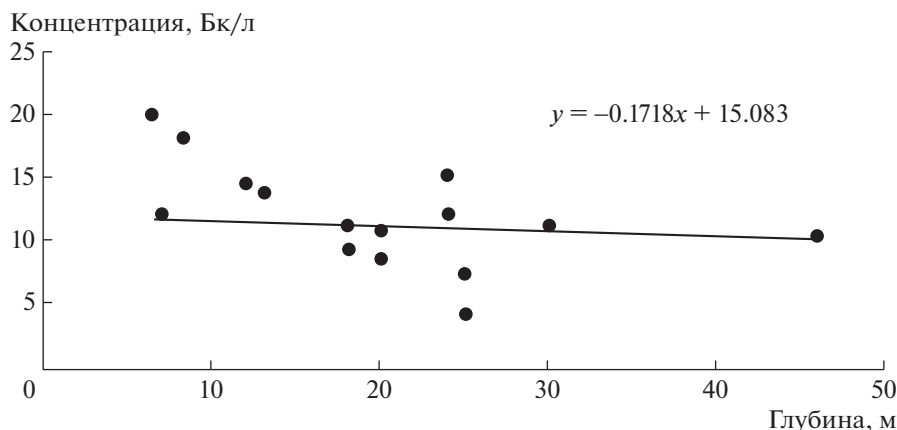


Рис. 5. Уровни концентраций трития в воде личных скважин в населенных пунктах по р. Пышма в зависимости от глубины источника, Бк/л.

Fig. 5. The levels of tritium concentration in the water of personal wells in settlements along the Pyshma river depending on the depth of the source, Bq/l.

р. Пышма сбрасывалась вода с повышенным содержанием трития — в среднем от 60 до 75 Бк/л. Вторым источником загрязнения р. Пышма являлось Ольховское болото, из которого радионуклид поступает в Пышму через небольшую речку Ольховку протяженностью ~3.5 км, вытекающую из болота. В период совместной работы энергоблоков (1-го и 2-го, 2-го и 3-го) концентрация трития в воде болота была сравнительно высокой — в среднем 3380 ± 1480 Бк/л ($n = 62$), что создавало повышенные уровни концентраций в воде р. Пышма. Согласно результатам мониторинга, в 1981 г., в период работы первых двух энергоблоков, содержание радионуклида в р. Пышма ниже места впадения р. Ольховка составляло 618 ± 323 Бк/л. В 1982–1983 гг., когда 1-й энергоблок был снят с эксплуатации, этот показатель снизился в среднем до 149 ± 31 Бк/л. Сброс воды в р. Пышма из Ольховского болота в то время приводил к формированию повышенных уровней тритиевого загрязнения реки в среднем до 50–100 Бк/л в пунктах наблюдения, расположенных на расстоянии до 120 км от устья р. Ольховка. После вывода из эксплуатации 2-го энергоблока концентрации трития в Ольховском болоте снизились до 1034 ± 156 Бк/л ($n = 62$). В этот период содержание радионуклида в водоеме-охладителе уменьшилось в 2–3 раза (в среднем до 22 Бк/л). В последующий период, связанный с проводимыми на АЭС мероприятиями по снижению поступления радионуклидов в окружающую среду, в том числе с реконструкцией сбросов в Ольховское болото, наблюдалось дальнейшее снижение поступления трития в р. Пышма. На фоне этого снижения наблюдались пиковые выбросы радионуклида, которые прослеживались также и в воде р. Пышма на значительном расстоянии от водоема-охладителя [7, 10, 11]. Представленные в настоящей ра-

боте данные о содержании трития в р. Пышма почти через 40 лет после начала наших исследований свидетельствуют о заметном снижении концентрации трития в ней к концу этого периода. К моменту пуска 4-го энергоблока уровни концентрации радионуклида в воде реки превышали принятый нами уровень техногенного фона от 3 до 5 раз.

Установлено, что в пойменной части реки надфоновое тритиевое загрязнение поступает в питьевую воду колодцев и скважин. Концентрация трития в колодезной воде достоверно снижается с увеличением расстояния населенного пункта от

Таблица 1. Средние концентрации трития в сетевой воде населенных пунктов, расположенных в пойменной зоне р. Пышма

Table 1. The concentration levels of tritium in the water of personal wells in settlements along the Pyshma river depending on the depth of the source

Населенный пункт	Глубина скважины, м	Концентрация, Бк/л
Курманка	не известна	12
Гагарка	«	14
Белоярский	«	16
Белокаменный	60–70	12
Знаменский	не известна	5
Сухой Лог	«	8
Новопышминский	«	18
Никольское	«	15
Пышма	«	17
Талица	~80	15
Среднее		13 ± 1

Таблица 2. Средние концентрации трития в родниковой воде населенных пунктов, расположенных в прибрежной зоне р. Пышма

Table 2. The average concentration of tritium in the spring water of settlements located in the coastal zone of the Pyshma river

Населенный пункт	Концентрация, Бк/л
Курманка	23
Гагарка	20
Крутиха	22; 17
Ялунино	26
Белокаменный	24
Сухой Лог	34
Новопышминский	14

плотины Белоярского водохранилища и с увеличением глубины источника. Содержание радионуклида в воде личных скважин имеет тенденцию к снижению с глубиной и практически не зависит от расстояния. На приплотинной территории наблюдались заметные колебания концентраций трития в воде, что возможно связано с характером подстилающих пород, имеющих разную плотность, что определяет поступление в скважину воды из водоносного горизонта. Уровни концентраций трития в сетевой воде, куда как правило она подается из одной или нескольких глубинных скважин, также практически не зависят от расстояния населенного пункта до водоема-охладителя.

Обнаруженное снижение концентрации радионуклида в колодезной воде населенных пунктов и воде р. Пышма с увеличением расстояния до плотины Белоярского водохранилища свидетельствует о том, что в колодцы тритиевое загрязнение поступает преимущественно из р. Пышма. В то же время практически постоянная концентрация радионуклида в скважинных водах на всем протяжении реки говорит о том, что водоносный горизонт, питающий скважины, преимущественно не связан с водой р. Пышма. Однако тот факт, что концентрация трития в нем в 2–3 раза превышает уровень техногенного фона, заставляет предположить, что возможным источником загрязнения скважин служит водоносный горизонт, расположенный под энергоблоками на территории БАЭС.

Повышенные концентрации трития в родниковой воде по сравнению с глубинными водами, очевидно, связаны с загрязнением ее за счет поступления трития от воздушных выбросов и поверхностных вод, имеющих более высокую концентрацию радионуклида.

Во всех пробах воды из р. Пышма и источников питьевого водоснабжения населенных пунк-

тов пойменной территории реки концентрации трития были значительно ниже уровня вмешательства, установленного для питьевой воды согласно принятым нормативам [12].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, тема № 122021000077-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бадяев В.В., Егоров Ю.А., Казаков С.В.* Охрана окружающей среды при эксплуатации АЭС. М.: Энергоиздат, 1990. 223 с. [*Badyaev V.V., Egorov Yu.A., Kazakov S.V.* Ohrana okruzhayushchej sredy pri ekspluatatsii AES. M.: Energoizdat, 1990. 223 s. (in Russ.)]
2. *Егоров Ю.А.* Еще раз о тритии, образующемся при работе АС, и его переносе в окружающей среде // Экология регионов атомных станций. М.: НИО ЭАС ГНИПКИИ “Атомэнергопроект”, 1996. С. 237–250 [*Egorov Yu.A.* Eshche raz o tritii, obrazuyushchemsya pri rabote AS, i ego perenose v okruzhayushchej srede // Ekologiya regionov atomnyh stancij. M.: NIO EAS GNIPKII “Atomenergoproekt”, 1996. S. 237–250 (in Russ.)]
3. Особенности радиационной обстановки на Урале / Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В. и др. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 150 с. [*Osobennosti radiacionnoj obstanovki na Urале / Utkin V.I., Chebotina M.Ya., Evstigneev A.V. i dr.* Ekaterinburg: UrO RAN, 2004. 150 s. (in Russ.)]
4. *Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваяева Е.Н. и др.* Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. Т. 2. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2007. 399 с. [*Trapeznikov A.V., Molchanova I.V., Karavaeva E.N. i dr.* Migraciya radionuklidov v presnovodnyh i nazemnyh ekosistemah. V. 2. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2007. 399 s. (in Russ.)]
5. *Соффер В.Н., Горячев В.А., Вакуловский С.М. и др.* Тритиевые исследования природных вод России. М.: ГЕОС, 2008. 285 с. [*Soffjer V.N., Goryachev V.A., Vakulovskij S.M. i dr.* Tritievye issledovaniya prirodnyh vod Rossii. M.: GEOS, 2008. 285 s. (in Russ.)]
6. *Трапезников А.В., Чеботина М.Я., Трапезникова В.Н. и др.* Влияние АЭС на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя. Екатеринбург: Академ-Наука, 2008. 400 с. [*Trapeznikov A.V., Chebotina M.Ya., Trapeznikova V.N. i dr.* Vliyanie AES na radioekologicheskoe sostoyanie vodoema-ohladyatelya. Ekaterinburg: AkademNauka, 2008. 400 s. (in Russ.)]
7. *Чеботина М.Я., Николин О.А.* Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе // Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 89 с. [*Chebotina M.Ya., Nikolin O.A.* Radioekologicheskie issledovaniya tritiya v Ural'skom regione // Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. 89 s. (in Russ.)]
8. *Чеботина М.Я.* Тритий в воде Белоярского водохранилища в период работы трех энергоблоков // Водное хозяйство России. 2010. № 4. С. 58–73

- [Chebotina M.Ya. Tritij v vode Beloyarskogo vodohranilishcha v period raboty trekh energoblokov // Vodnoe hozyaystvo Rossii. 2010. № 4. S. 58–73 (in Russ.)]
9. Чеботина М.Я., Николин О.А. Миграция трития от предприятий ядерного технологического цикла в источники питьевого водоснабжения на Урале // Водное хозяйство России. 2013. № 4. С. 90–100 [Chebotina M.Ya., Nikolin O.A. Migratsiya tritiya ot predpriyatij yadernogo tekhnologicheskogo tsikla v istochniki pit'evogo vodosnabzheniya na Urале // Vodnoe hozyaystvo Rossii. 2013. № 4. S. 90–100 (in Russ.)]
 10. Куликов Н.В., Реч Т.А., Чеботина М.Я. Тритий в воде болотно-речной экосистемы // Экология. 1984. № 4. С. 85–86 [Kulikov N.V., Rech T.A., Chebotina M.Ya. Tritij v vode bolotno-rechnoj ekosistemy // Ekologiya. 1984. № 4. S. 85–86 (in Russ.)]
 11. Чеботина М.Я., Николин О.А. Тритий в воде болотно-речной экосистемы в районе Белоярской АЭС // Уральский геофиз. вестн. 2005. № 7. С. 70–73 [Chebotina M.Ya., Nikolin O.A. Tritij v vode bolotno-rechnoj ekosistemy v rajone Beloyarskoj AES // Ural'skiy geofizicheskiy vestnik. 2005. № 7. S. 70–73 (in Russ.)]
 12. НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормы. СанПин 2.6.1.2423-09. Приложение 2а. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с. [NRB-99/2009. Sanitarnye pravila i normativy. SanPin 2.6.1.2423-09. Prilozhenie 2a. M.: Federal'nyj centr gigeny i epidemiologii Rospotrebнадзора, 2009. 100 s. (in Russ.)]

Tritium in the Water System of the Pyshma River Floodplain

M. Ya. Chebotina^{a,#}

^a*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia*
[#]*e-mail: Chebotina@ipae.uran.ru*

The paper presents data on the concentration of tritium in the water of the river Pyshma, which is under the influence of the Beloyarsk NPP named after Kurchatov, and drinking water of settlements located in the coastal zone of the river. It was found that the content of radionuclide in the water of the river at a distance of up to 400 km below the dam of the Beloyarsk reservoir varies within 13–26 Bq/l and significantly decreases along the course of the river. In the coastal part of the river, above-background tritium pollution enters the drinking water of wells and chinks. It is shown that in water samples from wells, the tritium concentration significantly decreases with increasing depth and distance from the dam of the Beloyarsk reservoir; in the water of private wells, such a relationship was not reliably recorded. The concentration levels of tritium in the spring water of 7 settlements located along the Pyshma river at different distances from the dam of the Beloyarsk reservoir, almost 2 times higher than in the water of deep chinks, have similar values and do not depend on the distance.

Keywords: tritium, Beloyarsk NPP, Pyshma river, settlements, wells, chinks, springs, network water