

УДК 550.422:631.41(282.256.166)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ^{137}CS И ^{90}SR В КОМПОНЕНТАХ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ**^{1,2}Кайгородов Р.В.**¹*Тобольская комплексная научная станция УрО РАН, Тобольск, e-mail: r-kaigorodov@yandex.ru;*²*ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», Пермь, e-mail: r.kaigorodov@yandex.ru*

Исследовано накопление радионуклидов в воде, донных отложениях и растениях-гидробионтах водных экосистем разного типа (реки, озера, старицы рек) юго-западной части Тюменской области. Образцы компонентов водных экосистем отбирали на участках исследованных нами ранее в отношении накопления радионуклидов в наземных частях пресноводных экосистем (пойменные почвы и прибрежно-водные макрофиты). Анализ удельной активности радиоактивных изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs проводили на гамма-бета спектрометре «Гамма Плюс» с использованием программного обеспечения «Прогресс-5». Установлены разные уровни удельной активности радионуклидов в водах, донных отложениях и растениях экосистем водных объектов разного типа (реки, старицы, озера). Повышенное содержание радионуклидов отмечено в компонентах водных экосистем основного русла р. Тобол на участках ниже по течению от места впадения р. Исеть, связанной гидрологической системой с территорией ПО «Маяк», где захоронены большие объемы радиоактивных отходов и происходили техногенные атомные аварии. Старицы р. Тобол и бессточные озера Имбиряй и Чигиркуль характеризовались достоверно низким уровнем накопления изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs в компонентах водных экосистем. Донные отложения обладали гранулометрическим составом следующих типов: тонкопесчано-глинистым (в основном русле р. Тобол) и илесто-глинистым (в старицах и озерах). Макрофиты всех исследуемых участков водоемов отличались повышенным накоплением радионуклидов по сравнению с водой и донными отложениями. Среди растений водных экосистем более высоким содержанием изотопов ^{90}Sr и ^{137}Cs отличались представители водорослей кладофора (*Cladophora fracta* Kutz) и хара (*Chara*).

Ключевые слова: водные экосистемы, вода, донные отложения, растения-макрофиты, техногенные радионуклиды, удельная активность, миграция

DISTRIBUTION OF RADIONUCLIDES ^{137}CS AND ^{90}SR IN COMPONENTS OF AQUATIC ECOSYSTEMS IN THE TYUMEN REGION**^{1,2}Kaygorodov R.V.**¹*Tobolsk Complex Scientific Station of the Ural Branch of the RAS, Tobolsk, e-mail: r-kaigorodov@yandex.ru;*²*Perm State University, Perm, e-mail: r-kaigorodov@yandex.ru*

The accumulation of radionuclides in water, sediments and plants hydrobionts of aquatic ecosystems of various types (rivers, lakes, oxbow lake) was studied in the south-western part of the Tyumen region. Samples of components of aquatic ecosystems were collected at the same sites that we had previously studied with respect to the accumulation of radionuclides in terrestrial parts of freshwater ecosystems (floodplain soils and coastal-aquatic macrophytes). Specific activity of technogenic radionuclides was analyzed on the gamma-beta spectrometer «Gamma Plus» with the software «Progress-5». Different levels of specific activity of radionuclides in waters, sediments and plants of ecosystems of water bodies of different types (rivers, oxbow lakes, lakes) have been established. The increased content of radionuclides was determined in the components of the aquatic ecosystems in riverbed of the Tobol River in the areas downstream from the confluence of the Iset River connected by a hydrological system with the territory of the «ПО Маяк», where large volumes of radioactive waste are buried and man-made nuclear accidents have occurred. The oxbow lakes of Tobol River and the closed lakes Imbirey and Chigerkul were characterized by a significantly low level of accumulation of isotopes ^{90}Sr and ^{137}Cs in the components of aquatic ecosystems. Studied sediments had the granulometric composition of the following types: fine-sandy-clay (riverbed of the Tobol River) and silty-clayey (oxbow lakes, lakes). Macrophytes of all studied areas of reservoirs were characterized by an increased accumulation of radionuclides compared to water and sediments. Among the plants of aquatic ecosystems, representatives of the algae *Cladophora* (*Cladophora fracta* Kutz) and hara *Chara* were distinguished by a higher content of isotopes ^{90}Sr and ^{137}Cs .

Keywords: aquatic ecosystems, water, sediments, macrophyte plants, technogenic radionuclides, specific activity, migration

Актуальность исследования связана с необходимостью мониторинга миграции радиоактивных техногенных изотопов в водных экосистемах, расположенных на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа и в сопредельных регионах. В результате радиационных катастроф на ПО «Маяк» в 1957 и 1967 гг. и многократных испытаний ядерного оружия в регионе, исследуемые

водосборные территории Тюменской области подвергались загрязнению долгоживущими радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Целью исследований являлось изучение накопления радионуклидов в воде, донных отложениях и растениях гидробионтах водных экосистем разного типа (реки, озера, старицы рек) юго-западной части Тюменской области.

Техногенные радионуклиды относятся к наиболее опасным загрязнителям в окружающей среде и обладают средней радиотоксичностью в отношении животных и человека [1]. Объекты атомной энергетики и ряда других отраслей промышленности (цветная металлургия, производство фотоэлементов, пиротехнических изделий, красок, цементное производство) являются источниками радиоактивных изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr [2].

Техногенные катастрофы на объектах атомной промышленности и испытания ядерного оружия также вносят существенный вклад в рассеивание радионуклидов в окружающей среде. Магматические горные породы служат естественными источниками долгоживущих радиоактивных изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr с периодами полураспада 30 и 29 лет соответственно. В процессе естественной и техногенной миграции радионуклиды аккумулируются в глинистых минералах, органическом веществе почвы, донных отложениях и биомассе живых организмов наземных и водных экосистем [1].

В ранних наших работах [3] и другими авторами [4, 5] было показано, что почвенный покров прибрежных экосистем, главным образом, органическое вещество, глинистые минералы и фосфаты, служат важнейшими факторами иммобилизации ^{137}Cs и ^{90}Sr на пути в миграции в водные объекты. Прибрежная фитомасса, в которой активно накапливаются радионуклиды, как из почвы, так и из водоемов или за счет атмосферного переноса, является одним из важнейших звеньев в их миграции [6].

Водные экосистемы и прилегающие к ним территории речных долин (поймы, надпойменные террасы) вследствие расположения в аккумулятивных формах рельефа являются слабоустойчивыми к накоплению техногенных загрязнителей. В связи с этим аквальные и субаквальные экосистемы нуждаются в постоянном мониторинге миграции радионуклидов с целью управления санитарно-гигиеническим состоянием и разработки мероприятий по охране водных объектов [6, 7].

Вода. Водоемы разного типа: открытые водные системы (реки), закрытые водоемы (озера) и технические водные сооружения (водохранилища) имеют разные гидрологические режимы, скорости образования донных отложений, отличаются видовым разнообразием гидробионтов. В связи с этим миграция, накопление и распределение загрязняющих веществ и радионуклидов,

в частности, протекают специфично для каждого типа водоемов. Речные системы служат одним из механизмов переноса радионуклидов от стационарных источников на большие расстояния. В закрытые бессточные озера техногенные радионуклиды поступают с площади прилегающей водосборной территории, а также за счет атмосферного переноса. Миграция, накопление и распределение техногенных радионуклидов в водных объектах ВУРСа (р. Теча, Исеть, Тура, Иртыш, Обь) изучены многими исследователями [7, 8]. Территория Тюменской области исследована в меньшей степени. Слабо изучена миграция радиоактивных изотопов в р. Тобол, старицах р. Тобол и бессточных озерах Имбиряй и Чигиркуль. Исследуемый нами регион представляет определенный интерес в связи с рассеиванием техногенных радионуклидов. Миграция техногенных радионуклидов с территорий их промышленного использования и размещения отходов происходит и путем поступления в грунтовые и подземные воды, через которые возможно проникновение радиоактивных изотопов в поверхностные воды [8].

Донные отложения. Поступившие в водные экосистемы радионуклиды аккумулируются в донных отложениях, служащих основным местом депонирования. В донные отложения могут поступать радионуклиды из почвенного покрова поймы водоемов. Донные отложения речных водных систем и русловые отложения переносятся за счет течения и паводковых процессов, что служит важнейшим фактором перераспределения РН на большие расстояния от источников и участков первичного депонирования. Донные отложения бессточных водоемов (озера) и стариц рек более надежно характеризуют накопление РН в водных системах той или иной местности.

Накопление радионуклидов в донных отложениях и их распределение по глубине определяется целым комплексом факторов.

Растительность. В отличие от воды и донных отложений рек, где содержание радионуклидов подвержено временной динамике, накопление радиоактивных изотопов в растениях служит более надежным показателем радиоактивного загрязнения аквальных и субаквальных экосистем [8].

Радионуклиды поглощаются растениями за счет их активного и пассивного поступления через мембраны клетки корня или, в случае водорослей, лишенных покровных тканей, через клетки всей поверхности растения. Далее у высших растений

поглощенные радионуклиды по симпласту поступают в сосуды и транспортируются в надземные органы [9].

Радиоактивный стронций обладает большей подвижностью и повышенной аккумуляцией в компонентах водных экосистем по сравнению с цезием. Высшие водные растения составляют основу фитомассы водоемов. Накопление радиоактивных изотопов в биомассе растений определяется широким спектром факторов внешней среды и видоспецифичными особенностями их избирательного поглощения [10].

Водные и прибрежно-водные растения характеризуются очень высокими коэффициентами накопления радионуклидов. Так, по некоторым данным у роголистника темно-зеленого, произрастающего на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, коэффициенты накопления для стронция составляют в среднем 459, для цезия – 5005. Прибрежно-водная осока на тех же территориях накапливает радионуклиды менее активно (коэффициент накопления стронция – 300 и цезия – 2000) [8]. Биомасса гидробионтов, наряду с фитомассой наземных растений, является источником вторичного поступления радиоактивных элементов в компоненты водных экосистем.

Материалы и методы исследования

Характеристика территории

Исследуемые нами водные объекты находятся на расстоянии от 360 до 430 км на северо-восток от ПО «Маяк». Речные объекты исследуемой территории связаны с гидрологической системой р. Исеть и ее притока р. Теча, подверженной воздействию ПО «Маяк».

Образцы воды, донных отложений и растений отбирали на участках исследованных нами ранее в отношении наземных частей пресноводных экосистем (пойменные почвы и прибрежно-водные макрофиты). Места расположения исследуемых участков представлены в табл. 1.

Отбор и подготовка проб воды к анализу. Образцы воды из исследуемых водоемов отбирали в соответствии с требованиями ГОСТ 31861-2012 [11]. На каждом участке воду из водоема отбирали в 5-кратной повторности на расстоянии не менее 25 м друг от друга. Отобранные пробы воды упаривали до сухого остатка, в котором определяли удельную активность радионуклидов. В р. Тобол исследуемые участки расположены у правого берега реки.

Образцы донных отложений отбирали согласно ГОСТ 17.1.5.01-80 [12]. Донные отложения отбирали на расстоянии 1–2 м от линии уреза воды в местах отбора проб воды на каждом участке в 5-кратной повторности с глубины 0–25 см.

В качестве растительных объектов были использованы представители водорослей: кладофора (*Cladophora fracta* Kutz) и род хара (*Chara*) и водных высших растений: ряска малая (*Lemna minor* L.) и стрелolist обыкновенный (*Sagittaria sagittifolia* L.). Ряска относится к экологической группе растений, плавающих на поверхности. Стрелolist входит в группу растений укореняющихся в грунте и с плавающими на поверхности листьями [10]. На каждом исследуемом участке растения отбирали в 5-кратной повторности по 200–300 г фитомассы на повторность, высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали в фарфоровой ступке и озоляли в муфельной печи при 450 °С.

Таблица 1

Географическое расположение исследуемых водных объектов и участков отбора образцов воды, донных отложений и растений-гидробионтов

Номер объекта	Тип и название водного объекта	Ближайшие населенные пункты	Географические координаты
№ 1	р. Тобол	д. Шашова	N 56,2218, E 66,1744
№ 2	р. Тобол	с. Упорово	N 56,1824, E 66,1244
№ 3	старица р. Тобол	с. Новолыбаево	N 56,2923, E 66,2118
№ 4	старица р. Тобол	с. Ярково	N 57,2359, E 67,0256
№ 5	оз. Имбиряй	г. Ялуторовск	N 56,3915, E 66,2150
№ 6	оз. Чигиркуль	с. Новоатъялово	N57,0050, E66,3344

Определение удельной активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Радиологический анализ проб: удельную активность радиоактивных изотопов ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs определяли на гамма-бета спектрометре «Гамма Плюс» с использованием программного обеспечения «Прогресс-5».

Математическая обработка данных. Математическую обработку результатов проводили в программе Past 3.16 с использованием методов описательной статистики и дисперсионного (показатель наименьшей существенной разности – НСР) анализа на 95 % уровне значимости.

Результаты исследования и их обсуждение

Вода. В механизмах поступления радионуклидов в водные объекты важнейшую роль играет расстояние от источников загрязнения, наличия гидрологической связи с водоемами, связанными с загрязненными участками, и удаленность от места впадения водоемов, подвергнутых радиоактивному загрязнению.

Из исследуемых нами водоемов гидрологическую связь с реками, подвергнутыми загрязнению на территории ПО «Маяк», имеют участки в русле р. Тобол. Один из участков расположен в 30 км ниже по течению от впадения р. Исеть, второй – в 42 км ниже по течению. В р. Исеть впадает р. Теча, берущая начало из озера Иртяш в окрестностях ПО «Маяк».

Один из участков старицы р. Тобол расположен в 12 км ниже от впадения р. Исеть и не связан напрямую с основным руслом, второй участок старицы расположен выше по течению от места впадения р. Исеть.

Бессточные озера Имбиряй и Чигиркуль расположены на расстоянии 370 км на северо-восток от ПО Маяк. Озеро Имбиряй находится вблизи от основного русла р. Тобол. Озеро Чигиркуль удалено от р. Тобол на 6 км. Оба озера расположены выше места впадения р. Исеть в р. Тобол. В табл. 2 представлены данные по среднему содержанию радионуклидов в пределах исследуемых участков водных объектов.

Как видно из табл. 2, максимальное содержание радионуклидов установлено в воде р. Тобол на участке, расположенном ближе всех к месту впадения р. Исеть (участок № 1). С увеличением расстояния от впадения р. Исеть содержание ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в воде р. Тобол достоверно снижается. По данным других исследователей [8] в 1995 г. содержание изотопа ⁹⁰Sr в воде р. Тобол ниже по течению от впадения

р. Исеть составляло 235 Бк/м³ т.е. снизилось к настоящему времени в 2,5 раза.

Таблица 2
Содержание радионуклидов в воде исследуемых участков, Бк/м³

Исследуемый участок	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
№ 1 р. Тобол	95 ± 4	15 ± 3
№ 2 р. Тобол	68 ± 5	9,7 ± 2
№ 3 старица р. Тобол	43 ± 3	5,5 ± 0,9
№ 4 старица р. Тобол	5,1 ± 2	2,8 ± 0,7
№ 5 оз. Имбиряй	4,5 ± 0,8	1,1 ± 0,3
№ 6 оз. Чигиркуль	2,5 ± 0,7	2,1 ± 0,2
НСР05	2,5	1,5

Примечание. ± – стандартная ошибка, НСР05 – показатель наименьшей существенной разности при 5%-ном уровне значимости.

Содержание радионуклидов в воде старицы р. Тобол выше от впадения р. Исеть и в бессточных озерах было минимальным и не отличалось достоверно между этими водоемами.

Изотопы ⁹⁰Sr являются более подвижными в окружающей среде по сравнению с ¹³⁷Cs [10], что подтверждается и нашими данными по содержанию радионуклидов в исследованных водоемах.

Донные отложения. Донные отложения на участках основного русла р. Тобол обладали тонко-песчано-глинистым гранулометрическим составом, донные отложения исследованных стариц р. Тобол и озер Имбиряй и Чигиркуль относились к илисто-глинистым по механическому составу. Мелкодисперсные фракции гранулометрического состава являются поглотителями радионуклидов в водоемах.

Таблица 3
Содержание радионуклидов в донных отложениях (слой 0–20 см) исследуемых участков, Бк/кг сухой массы

Исследуемый участок	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
№ 1 р. Тобол	10,5 ± 1	6,7 ± 1,2
№ 2 р. Тобол	9,4 ± 0,7	5,6 ± 2,1
№ 3 старица р. Тобол	4,8 ± 0,5	2,1 ± 0,8
№ 4 старица р. Тобол	3,3 ± 0,6	3,4 ± 0,7
№ 5 оз. Имбиряй	1,1 ± 0,2	1,3 ± 0,3
№ 6 оз. Чигиркуль	1,5 ± 0,3	0,9 ± 0,2
НСР05	1,3	0,75

Примечание. ± – стандартная ошибка, НСР05 – показатель наименьшей существенной разности при 5%-ном уровне значимости.

Как видно из табл. 3, максимальное содержание радионуклидов отмечено в донных отложениях основного русла р. Тобол ниже по течению от места впадения р. Исеть. По данным других исследований [8] в 1995 г. в донных отложениях р. Тобол вблизи наших участков среднее содержание ^{90}Sr в слое 0–20 см составляло 15,8 Бк/кг, содержание ^{137}Cs – 6,4 Бк/кг. Таким образом, содержание более подвижного изотопа ^{90}Sr снизилось примерно на 36%. При этом содержание менее мобильного в среде ^{137}Cs практически не изменилось. В старицах р. Тобол и озерах, т.е. водоемах, не связанных с речной сетью, содержание радионуклидов достоверно ниже, чем в русле р. Тобол.

Растения. Как показали наши исследования, содержание радионуклидов в биомассе водорослей кладофора и хара существенно выше, по сравнению с высшими растениями ряской малой и стрелолистом обыкновенным. Более активное поступление ^{90}Sr и ^{137}Cs в ткани водорослей связано с отсутствием у них покровных тканей и поглощением веществ всем телом растения. Следует отметить, что более подвижный изотоп ^{90}Sr накапливается в биомассе всех исследованных растений в большем количестве, чем ^{137}Cs .

В русле р. Тобол содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs достоверно снижается с удалением ис-

следуемых участков от места впадения р. Исеть. В старицах р. Тобол и озерах Имбиряй и Чигиркуль содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в макрофитах существенно ниже, чем в основном русле р. Тобол (табл. 4).

По сравнению с водными макрофитами прибрежно-водные растения, произрастающие в пойме р. Тобол на тех же участках [6], более интенсивно накапливают ^{137}Cs , чем ^{90}Sr .

Заключение

Как показали проведенные исследования, повышенное содержание радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в объектах водных экосистем (вода, донные отложения, растения) установлено на участках основного русла р. Тобол в местах, расположенных ниже по течению от впадения р. Исеть. Данные участки связаны в гидрологическом отношении с территорией ПО «Маяк», где размещены большие объемы радиоактивных отходов и ранее имели место испытания ядерного оружия, а также происходили техногенные катастрофы. В период с 1995 г. [8] по настоящее время в исследуемых участках р. Тобол наблюдается снижение содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде и донных отложениях. Старицы р. Тобол и озера Имбиряй и Чигиркуль характеризовались достоверно более низким накоплением радионуклидов в компонентах водных экосистем.

Таблица 4

Содержание радионуклидов в фитомассе макрофитов исследуемых участков, Бк/кг сухой массы

Исследуемый участок	^{90}Sr				^{137}Cs			
	Кладофора	Хара	Ряска	Стрелолист	Кладофора	Хара	Ряска	Стрелолист
№ 1 р. Тобол	172 ± 3	148 ± 3	21 ± 4	36 ± 3	100 ± 2	38 ± 2	22 ± 0,4	5,4 ± 0,2
№ 2 р. Тобол	165 ± 4	139 ± 5	15 ± 3	28 ± 4	120 ± 3	49 ± 3	14 ± 0,3	6,2 ± 0,2
№ 3 старица р. Тобол	40 ± 5	27 ± 2	5 ± 0,8	12 ± 2	5 ± 0,5	3 ± 1	1,2 ± 0,6	0,62 ± 0,08
№ 4 старица р. Тобол	32 ± 4	21 ± 3	3,8 ± 0,7	9 ± 2	7 ± 0,8	2 ± 0,8	1,0 ± 0,2	0,48 ± 0,05
№ 5 оз. Имбиряй	18 ± 2	19 ± 2	2,4 ± 0,6	5 ± 0,8	1,2 ± 0,4	1,1 ± 0,7	0,8 ± 0,1	0,12 ± 0,04
№ 6 оз. Чигиркуль	14 ± 3	12 ± 2	1,7 ± 0,4	7 ± 0,9	2,1 ± 0,5	3,1 ± 0,8	0,9 ± 0,1	0,14 ± 0,04
НСР05	4	6	2,0	3	2,3	1,2	0,21	0,15

Примечание. ± – стандартная ошибка, НСР05 – показатель наименьшей существенной разности при 5%-ном уровне вероятности.

Статья подготовлена при финансовой поддержке ФАНО России в рамках темы «Антропогенная трансформация пойменных экосистем Обь-Иртышского бассейна» (№ НИОКТР АААА-А19-119012190088-0).

Список литературы / References

1. Бахур А.Е. Новые методические рекомендации по подготовке проб и измерениям суммарной активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов в пробах пресных и минерализованных природных вод // АНРИ. 2009. № 1 (56). С. 47–48.

Bakhur A.E. New guidelines for sample preparation and measurement of the summary activity of alpha- and beta-emitting radionuclides in samples of fresh and mineralized natural waters // ANRI. 2009. Vol. 1. № 56. P. 47–48 (in Russian).

2. Ашинов Ю.Н., Схашок Ф.Ю. Радионуклиды ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr пахотных почвах Адыгеи // Новые технологии. 2013. № 1. С. 56–59.

Ashinov U.N., Schashok F.U. Radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in agricultural soils of Aдыгея // Novye tehnologii. 2013. № 1. P. 56–59 (in Russian).

3. Кайгородов Р.В. Удельная активность радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почвах прибрежных зон водных объектов Тюменской области // Успехи современного естествознания. 2020. № 9. С. 66–70.

Kaygorodov R.V. The specific activity of radionuclides ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the soils of the coastal zones of water objects of the Tyumen region // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2020. № 9. P. 66–70 (in Russian).

4. Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Шуктомова И.И. Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно-и среднетаежных подзон республики Коми // Почвоведение. 2017. № 7. С. 824–829.

Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Shuktomova I.I. Artificial and natural radionuclides in the soils in subzones of the southern and middle taiga of the Komi Republic // Pochvovedenie. 2015. № 7. P. 824–829 (in Russian).

5. Романенко А.А., Левкина Г.В. Миграция цезия-137 в системе почва – растение на различных типах естественных лугов // Аграрная наука. 2015. № 7. С. 7–9.

Romanenko A.A., Levkina G.V. Migration of caesium-137 in the soil-plant system in various types of natural meadows // Agrarnaya nauka. 2015. № 7. P. 7–9 (in Russian).

6. Кайгородов Р.В. Биогенная аккумуляция радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr растениями экосистем поймы р. Тобол // Успехи современного естествознания. 2020. № 12. С. 80–84.

Kaygorodov R.V. Biogenic accumulation of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr radionuclides by plants of Tobol River floodplain ecosystems // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2020. № 12. P. 80–84 (in Russian).

7. Бахвалов А.В., Лаврентьева Г.В., Сынзыныс Б.И. Биогеохимическое поведение ⁹⁰Sr в наземных и водных экосистемах // Биосфера. 2012. Т. 4. № 2. С. 206–216.

Bakhvalov A.V., Lavrenteva G.V., Synzynys B.I. Biogeochemical behavior of ⁹⁰Sr in terrestrial and aquatic ecosystems // Biosfera. 2012. Vol. 4. № 2. P. 206–216 (in Russian).

8. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. Том I. Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука», 2014. 496 с.

Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. Radio-ecological monitoring of freshwater ecosystems. Vol. I. Ekaterinburg: AkademNauka, 2014. 496 p. (in Russian).

9. Парамонов Т.А., Мамихин С.В. Корневое поглощение ¹³⁷Cs и его распределение между надземными и подземными органами растений: анализ литературы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57. № 6. С. 646–662.

Paramonov T.A., Mamikhin S.V. Root uptake of ¹³⁷Cs and its distribution between aboveground and underground plant organs: literature analysis // Radiacionnaya biologiya. Radioecologiya. 2017. Vol. 57. № 6. P. 646–662 (in Russian).

10. Калининченко С.А. Оценка динамики накопления ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr высшей водной растительностью водоемов различных типов в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58. № 1. С. 85–97.

Kalinichenko S.A. Assessment of the dynamics of accumulation of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr by higher aquatic vegetation of reservoirs of various types in the Belarusian sector of the Chernobyl exclusion zone // Radiacionnaya biologiya. Radioecologiya. 2018. Vol. 58. № 1. P. 85–97 (in Russian).

11. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2019. 32 с.

12. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: ИПК «Издательство стандартов», 2002. 7 с.