

УДК 539.163:574.63 : 631.4

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДЕ, ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И ПОЙМЕННЫХ ПОЧВАХ НИЖНЕЙ ОБИ В ГРАНИЦАХ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

© 2018 г. А. В. Трапезников<sup>1,\*</sup>, В. Н. Николкин<sup>1</sup>, А. В. Коржавин<sup>1</sup>, В. Н. Трапезникова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

\*E-mail: bfs\_zar@mail.ru

Поступила в редакцию 03.08.2017 г.

Представлены данные по содержанию  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде, донных отложениях и пойменных почвах Нижней Оби, относящиеся к периоду исследований 2014–2016 гг. Приведены эмпирические модели, описывающие закономерности горизонтального распределения радионуклидов в воде, пойменных почвах и донных отложениях вдоль течения реки. Выполнена оценка запасов радионуклидов в пойменных почвах и донных отложениях обследованного участка. Показано, что почти весь поступающий по Оби  $^{90}\text{Sr}$  транзитом проходит участок Нижней Оби и практически без потерь переносится в Обскую Губу. Объемная активность  $^{137}\text{Cs}$  в воде монотонно снижается на всем протяжении исследованного участка. При этом плотность запасов  $^{137}\text{Cs}$  в пойменных почвах экспоненциально возрастает вниз по течению, что свидетельствует о процессах фиксации  $^{137}\text{Cs}$  из водной компоненты пойменными почвами и донными отложениями вследствие его низкой миграционной способности. В настоящее время в Нижней Оби депонирован значительный объем радионуклидов, суммарные запасы которых в пойме и донных отложениях на участке протяженностью 431 км составили по  $^{90}\text{Sr}$  –  $3.0 \times 10^{13}$  Бк,  $^{137}\text{Cs}$  –  $2.0 \times 10^{13}$  Бк.

**Ключевые слова:** радионуклиды, вода, пойменные почвы, донные отложения, миграция, эмпирические модели, интегральные запасы, река Обь

DOI: 10.1134/S0869803118040161

Бассейну р. Оби принадлежит важное место в экономике России, ее водные ресурсы обеспечивают потребности населения и жизнедеятельности региона, используются для водоснабжения, судоходства, рыболовства и рекреации. В пределах территории Обского бассейна проживает 22 млн человек (15% от всего населения России). Среди рек России Обь занимает первое место по площади водосбора, второе место по длине и третье (после Енисея и Лены) по водоносности.

В связи с развитием предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) в Российской Федерации значительная часть водных экосистем оказалась подверженной поступлению радиоактивных веществ. Особую озабоченность вызывает радиоэкологическая ситуация, сложившаяся в Обь-Иртышской речной системе.

В 1949–1952 гг., вследствие отсутствия надлежащих технологических систем обращения с жидкими отходами радиохимического производства, с ПО “Маяк” было сброшено 100 ПБк (2.75 млн Ки) радиоактивных отходов в р. Теча, являющуюся частью Обь-Иртышской речной системы. В результате облучению подверглись 124 тыс. человек, проживавших в прибрежной зо-

не рек Течи и Исети в пределах Челябинской и Курганской областей [1].

Особую опасность вызывает сосредоточение средне- и низкоактивных жидких радиоактивных отходов в открытых водоемах. Под оз. Карачай, являвшимся приемником среднеактивных отходов, находится около 4.4 ЭБк (120 млн Ки) активности, преимущественно, за счет  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . В каскаде промышленных водоемов, созданных в пойменной части верховьев р. Теча, после прекращения сбросов в нее отходов радиохимического производства, накоплено 350 млн м<sup>3</sup> загрязненной воды, являющейся по сути низкоактивными отходами с суммарной активностью около 7.4 ПБк (200 тыс. Ки). В пойме р. Течи в 18 км от плотины оконечного водоема на площади 45 га, в так называемых Асановских болотах, депонировано 0.22 ПБк (6 тыс. Ки)  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Часть этой активности ежегодно вымывается с паводковыми водами в Обь-Иртышскую речную систему [2].

Обь-Иртышская речная система также подвержена радиационному воздействию от Сибирского химического комбината, находящегося на площади водосбора р. Томь, впадающей в Обь. Суммарная активность радиоактивных отходов,

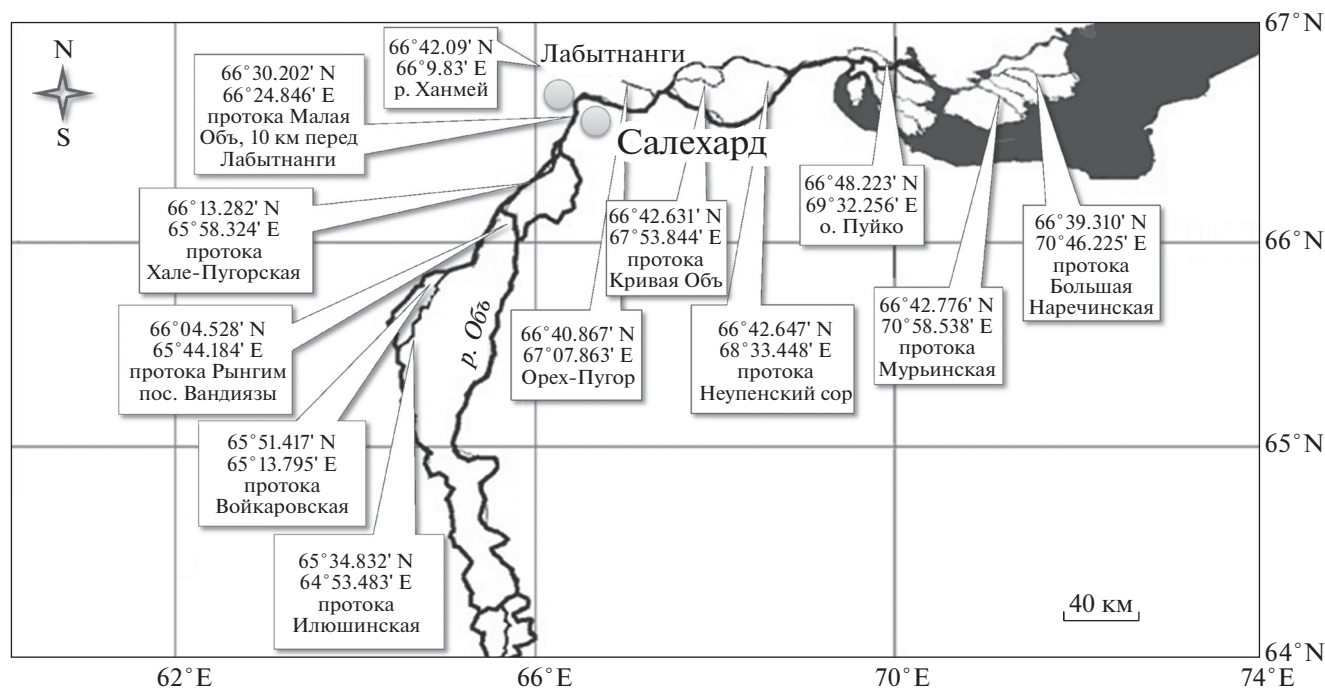


Рис. 1. Карта-схема расположения точек отбора проб на р. Обь.

хранящихся в подземных пластах этого предприятия, оценивается в настоящее время в 15 ЭБк (400 млн Ки) [3]. Полигоны захоронения жидких радиоактивных отходов (ЖРО) расположены на территории санитарно-защитной зоны комбината. На этой территории находятся также и другие объекты обращения с РАО: поверхностные бассейны-хранилища, промышленные водоемы, хранилища твердых отходов. Эксплуатация подземных захоронений на СХК была начата в 1963 г. на экспериментальном полигоне и продолжалась до 1975–1980 гг. После этого часть скважин была выведена из эксплуатации, а на других проводились контрольные наблюдения. Общий объем захороненных РАО на экспериментальном полигоне составил около 2 млн м<sup>3</sup>.

Кроме вышеназванных источников определенный вклад в радиоактивное загрязнение рек Обь-Иртышского бассейна вносят также действующая Белоярская АЭС, ряд предприятий ЯТЦ и глобальные выпадения.

Представленные в статье результаты являются продолжением крупномасштабных научно-мониторинговых исследований Обь-Иртышской речной системы, ранее обобщенных в работах [4, 5].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Полевые работы, связанные с отбором проб на р. Обь и ряде ее протоков в границах Ямало-Немецкого автономного округа (ЯНАО), были вы-

полнены в период 2014–2016 гг. Общая протяженность обследованного участка реки составила около 431 км, из которых 171 км выше по течению от г. Лабытнанги и 260 км ниже по течению. Координаты точек отбора проб определяли при помощи спутниковой навигационной системы GPS с использованием GPS-приемника марки “eTrex” (GARMIN, Германия). Точность определения координат составляет 10–50 м. Расположение точек отбора проб и их координаты представлены на карте-схеме (рис. 1). Удаленность исследованных участков относительно створа, расположенного в 10 км выше г. Лабытнанги и выбранного в качестве нулевой точки отсчета, определяли трассировкой вдоль русла Оби, используя приложение Яндекс-карты и встроенный инструмент (Яндекс-линейка).

Пробы воды для спектрометрических и радиохимических исследований отбирали в емкости из полимерного материала и сразу подкисляли небольшим количеством азотной кислоты для предотвращения сорбции радионуклидов на стенках сосудов. В целях получения объективных результатов все пробы отбирали в двух повторностях по 90 л в каждой. В лабораторных условиях пробы воды выпаривали до сухого остатка. Сухой остаток помещали в муфельную печь при  $t = 450^\circ\text{C}$  на 8 ч. После остывания остаток растирали пестиком до мелкодисперсного порошка.

Пробы пойменных почв отбирали из полнопрофильных разрезов. После заглабления разреза на необходимую глубину один край выравнивали

и из него послойно отбирали пробы в виде рамки  $20 \times 20$  см, последовательно снимая слои по 5 см на глубину до 30 см. В каждом створе отбор проб почв выполняли в трех точках, расположенных в углах равностороннего треугольника со стороной 10 м, в каждой точке пробы отбирали в двух повторностях. Пробы маркировали и упаковывали в двойные полиэтиленовые пакеты для транспортировки. В лабораторных условиях предварительная подготовка проб почвы включала в себя сушку, дробление, просеивание и размол.

Образцы донных отложений отбирали с помощью трубчатого пробоотборника с площадью сечения  $38.5 \text{ см}^2$  до глубины 30 см. После извлечения из пробоотборника каждый керн разделяли на последовательные сегменты по 5 см, упаковывали в двойные полиэтиленовые пакеты и маркировали. Предварительную подготовку проб донных отложений проводили аналогично пробам почвы.

Определение содержания радионуклидов в отобранных образцах воды пойменных почв и донных отложений выполняли согласно аттестованным методикам [6–9].

Измерения  $^{137}\text{Cs}$  в нативных образцах окружающей среды проводили по гамма-линии радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  – 661.2 кэВ на низкофономом полупроводниковом гамма-спектрометре рентгеновского и  $\gamma$ -излучения “DSPTC-jr” (“Ortec”, США) с коаксиальной детекторной системой на базе высокоочищенного германия (HPGe), с эффективностью 40% при ошибке измерения не более 10%.

Измерение  $^{90}\text{Sr}$  в образцах с низкой активностью проводили после радиохимической обработки на малофономой установке УМФ-2000 с нижним пределом обнаружения 0.02 Бк/кг и статистической ошибкой измерения не более 10%.

Пробы воды для количественного определения трития предварительно концентрировали методом одноступенчатого электролиза с одним или двумя доливами [10]. Определение  $^3\text{H}$  в водных образцах выполнялось на жидкосцинтилляционном спектрометрическом комплексе СКС-07П-Б11 в соответствии с Методикой выполнения измерений активности  $\alpha$ -,  $\beta$ -излучающих радионуклидов. Диапазон измерения радионуклидов в счетных образцах от 0.05 Бк до  $2 \times 10^4$  Бк, предел допустимой основной погрешности  $\pm 10\%$ .

Статистическая обработка результатов заключалась в определении среднеарифметического значения и среднего квадратического отклонения. Для выявления закономерностей переноса радионуклидов в природных средах были применены методы математического моделирования. Оценку качества эмпирических моделей проводили по уровню коэффициента детерминации  $R^2$ , который являлся первичным критерием для вы-

бора вида аппроксимирующей зависимости. Предпочтение отдавали простым однофакторным моделям – линейной или экспоненциальной функциям. Адекватность выбранных регрессионных моделей оценивали по критерию Фишера  $F = R^2/[1 - R^2] \times [f_2/f_1]$ , где  $R$  – коэффициент корреляции,  $f_1$  и  $f_2$  – число степеней свободы объясненной и необъясненной дисперсий. В качестве критического значения  $F$ -критерия Фишера стандартно принималось табличное значение  $F_{\text{крит}} = F(0.05, f_1, f_2)$  при уровне значимости 0.05. Эмпирическая модель рассматривалась как адекватная, если расчетное значение экспериментального критерия Фишера  $F_{\text{экс}}$  превышало критическое значение  $F_{\text{крит}}$ , в противном случае аппроксимирующее уравнение усложнялось, либо из экспериментального массива данных отбрасывалась наиболее выпадающая точка и весь описанный процесс математической обработки повторялся снова. В любом случае объем выборки был не менее восьми точек, и в большинстве случаев экспериментальный массив представлял 10–12 значений. При выборе аппроксимирующих уравнений мы считали нецелесообразным использование полиномов более высокого порядка, чем кубические, и если разброс экспериментальных значений не позволял получить надежные аналитические выражения, то мы ограничивались использованием средних значений в выборке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Содержание радионуклидов в воде и оценка годового стока радионуклидов*

Удельная активность радионуклидов в пробах воды представлена в табл. 1. Следует отметить, что содержание радионуклидов в воде Оби существенно ниже уровней вмешательства, предусмотренных Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) для питьевой воды [11]. Согласно НРБ-99/2009, уровни вмешательства при содержании в воде отдельных радионуклидов составляют:  $^3\text{H}$  – 7600 Бк/л,  $^{90}\text{Sr}$  – 4.9 Бк/л,  $^{137}\text{Cs}$  – 11.0 Бк/л. Таким образом, объемная активность трития и  $^{137}\text{Cs}$  в воде Нижней Оби на три порядка величин ниже уровня вмешательства,  $^{90}\text{Sr}$  – на два порядка величин ниже уровня вмешательства.

На рис. 2 приведены графики изменения объемной активности  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде на протяжении исследованного участка Оби. Профили объемной активности радионуклидов на исследуемом участке вдоль течения Оби удовлетворительно аппроксимируются кубическими полиномами, а изотопное отношение  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  – линейным уравнением:

$$^{90}\text{Sr} \text{ (Бк/л)} = 1.48 \times 10^{-9} x^3 - 8.91 \times 10^{-8} x^2 - 5.07 \times 10^{-5} x + 0.016;$$

**Таблица 1.** Объемная активность радионуклидов в пробах воды

Год	Наименование створов	Удельная активность, Бк/л		
		<sup>3</sup> H	<sup>90</sup> Sr	<sup>137</sup> Cs
2014	р. Обь, Неупенский сор	—	0.013 ± 0.001	0.039 ± 0.002
	р. Обь, остров Пуйко	—	0.010 ± 0.002	0.007 ± 0.001
	р. Обь, 10 км выше Лабытнанги	—	0.007 ± 0.002	0.007 ± 0.001
2015	р. Обь, 10 км выше Лабытнанги	5.8 ± 0.4	0.013 ± 0.002	0.004 ± 0.001
	р. Обь, Орех-Пугор	4.5 ± 0.5	0.042 ± 0.003	0.005 ± 0.0005
	протока Кривая Обь	3.7 ± 0.4	0.025 ± 0.002	0.008 ± 0.002
	протока Большая Наречинская	3.0 ± 0.3	0.019 ± 0.003	0.001 ± 0.0001
2016	протока Мурьинская	2.7 ± 0.2	0.016 ± 0.002	0.005 ± 0.0001
	протока Илюшинская	3.7 ± 0.4	0.015 ± 0.004	0.012 ± 0.004
	протока Войкаровская	2.7 ± 0.4	0.015 ± 0.003	0.013 ± 0.003
	протока Рынгим	3.2 ± 0.4	0.017 ± 0.002	0.012 ± 0.002
	протока Хале-Пугорская	3.5 ± 0.6	0.016 ± 0.002	0.012 ± 0.001
	р. Обь, 10 км выше Лабытнанги	3.9 ± 0.6	0.018 ± 0.002	0.015 ± 0.004

$$R^2 = 0.71; \quad n = 9;$$

$$F_{\text{факт}} = 4.080 < F_{\text{крит}}(0.05, 3.5) = 5.410, \quad (1)$$

{также  $F_{\text{факт}} = 4.080 > F_{\text{крит}}(0.1, 3.5) = 3.936$  при  $\alpha = 0.1$ },

среднее значение  $0.015 \pm 0.005$ .

$$^{137}\text{Cs} \text{ (Бк/л)} = 5.47 \times 10^{-10} x^3 - 9.58 \times 10^{-8} x^2 - 3.87 \times 10^{-5} x + 0.011; \quad (2)$$

$$R^2 = 0.77; \quad n = 10;$$

$$F_{\text{факт}} = 6.696 > F_{\text{крит}}(0.05, 3.6) = 4.757,$$

$$^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr} = -0.0014x + 0.63;$$

$$R^2 = 0.66; \quad n = 9; \quad (3)$$

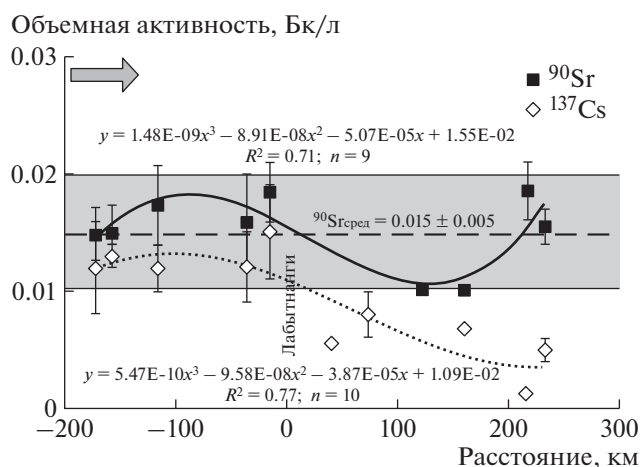
$$F_{\text{факт}} = 13.588 > F_{\text{крит}}(0.05, 1.7) = 5.591,$$

где  $x$  – расстояние от створа Лабытнанги в километрах (здесь и далее во всех формулах); условные отрицательные значения приняты для створов перед Лабытнанги, положительные – после.

Продольное распределение <sup>90</sup>Sr (рис. 2) характеризуется отсутствием выраженного тренда по течению реки. Кубический полином (1) соответствует F-критерию Фишера только при уровне значимости 0.1. Объемная активность данного радионуклида в большинстве створов варьирует в диапазоне 0.01–0.02 Бк/л (данная область выделена на графике). Принимая во внимание интервалы стандартных отклонений локальных содержаний, объемную активность <sup>90</sup>Sr на всем протяжении исследованного участка Оби можно представить средним значением  $0.015 \pm 0.005$  Бк/л, где абсолютная расширенная неопределенность принята с коэффициентом охвата 2.

Одновременно с этим отмечается постепенное снижение на протяжении исследуемого участка объемной активности <sup>137</sup>Cs (рис. 2) от начальных значений 0.012–0.013 Бк/л на входных створах (протоки Илюшинская и Войкаровская) до 0.001–0.005 Бк/л в конечных створах, расположенных ближе к Обской Губе.

Изотопное отношение <sup>137</sup>Cs/<sup>90</sup>Sr для объемных активностей в воде Оби (рис. 3) снижается от значений, близких к единице для наиболее удаленных створов, до значений 0,2 и ниже для створов, расположенных ближе к Обской Губе, и в целом



**Рис. 2.** Изменение объемной активности <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs в воде по течению Оби.

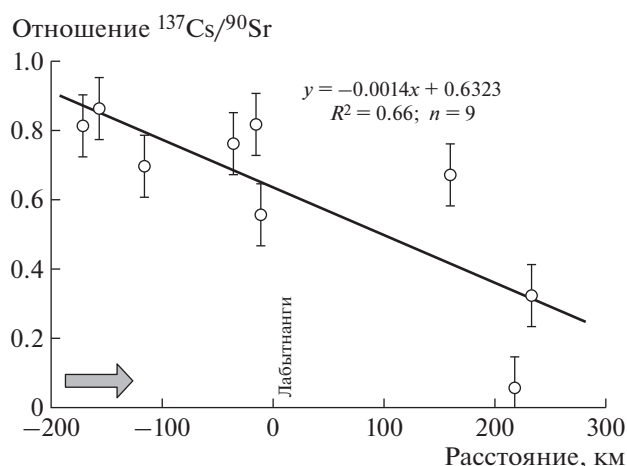


Рис. 3. Изменение изотопного отношения объемных активностей  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  в воде по течению Оби.

удовлетворительно аппроксимируется линейным уравнением регрессии (3). Такой ниспадающий ход зависимости объясняется более высокой подвижностью  $^{90}\text{Sr}$  по сравнению с  $^{137}\text{Cs}$ , который легко сорбируется и удерживается донными отложениями и пойменными почвами, вследствие чего содержание его в воде по течению реки уменьшается.

Изменение объемной активности трития в воде Нижней Оби представлено на рис. 4. Среднее значение объемной активности трития на рассматриваемом участке Оби характеризуется величиной  $3.4 \pm 0.6$  Бк/л. Содержание трития в воде на этом участке, за исключение двух точек, также удовлетворительно описывается параболическим уравнением:

$$\begin{aligned} {}^3\text{H} \text{ (Бк/л)} &= -3.42 \times 10^{-5} x^2 + \\ &+ 2.82 \times 10^{-3} x + 3.95; \\ R^2 &= 0.85; \quad n = 8; \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_{\text{факт}} = 13.840 > F_{\text{крит}}(0.05, 2.5) = 5.786;$$

среднее значение  $3.4 \pm 0.6$ .

В целом содержание трития в воде достаточно низкое и не превышает фоновых значений, принятых для данного региона [12]. Более высокие значения содержания трития отмечены на участках, расположенных в районе городов Лабытнанги и Салехард, более низкие показатели — на входных и выходных створах.

Годовые стоки радионуклидов определяли произведением объемной активности радионуклида на среднегодовой сток воды в створе. Соответствующие расчетные величины годовых стоков радионуклидов для створа Лабытнанги приведены в табл. 2.

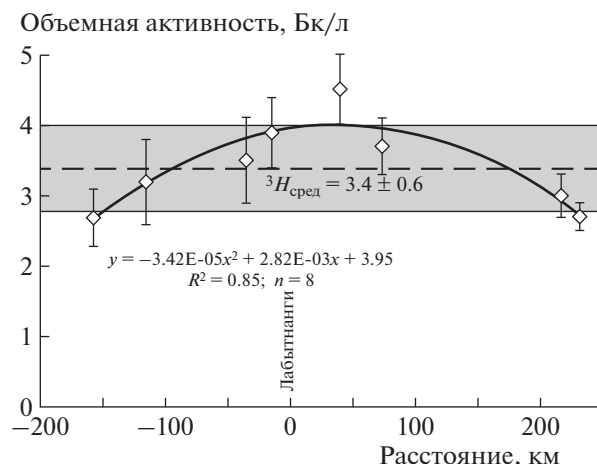


Рис. 4. Объемная активность трития в воде исследованных створов Оби.

#### Содержание радионуклидов в пойменных почвах и донных отложениях Нижней Оби и оценка их интегральных запасов

Величину плотности запасов радионуклидов в пойменных почвах и донных отложениях исследованных створов определяли послойным суммированием активностей радионуклидов в пробах, нормируя полученные результаты на квадратный метр. Изменение плотности запасов радионуклидов в пойме на исследованном участке нижней Оби приведено на рис. 5. Из приведенных данных следует, что расчетные величины запасов  $^{90}\text{Sr}$  варьируют около среднего значения  $3010 \pm 809$  Бк/м<sup>2</sup>, в то время как плотность запасов  $^{137}\text{Cs}$  на исследованном участке поймы Оби экспоненциально возрастает вниз по течению (рис. 5, а), увеличиваясь от  $\sim 1000$  до  $\sim 3000$  Бк/м<sup>2</sup> и достигая уровней, характерных для  $^{90}\text{Sr}$ . Регрессионные уравнения с результатами статистических тестов представлены выражениями (5–7) и используются далее в виде подинтегральных функций в расчетах общих запасов радионуклидов.

$${}^{90}\text{Sr} \text{ (Бк/м}^2\text{)} = -1.76 \times 10^{-4} x^3 +$$

Таблица 2. Оценка годовых стоков радионуклидов в створе Лабытнанги

Параметр	${}^3\text{H}$	${}^{90}\text{Sr}$	${}^{137}\text{Cs}$
Средняя объемная активность радионуклида, Бк/м <sup>3</sup>	4850.0	12.7	8.7
Годовой сток радионуклида, Бк	$1.9 \times 10^{15}$	$5.0 \times 10^{12}$	$3.4 \times 10^{12}$
Средний многолетний годовогой сток воды, м <sup>3</sup>	$3.94 \times 10^{11}$		

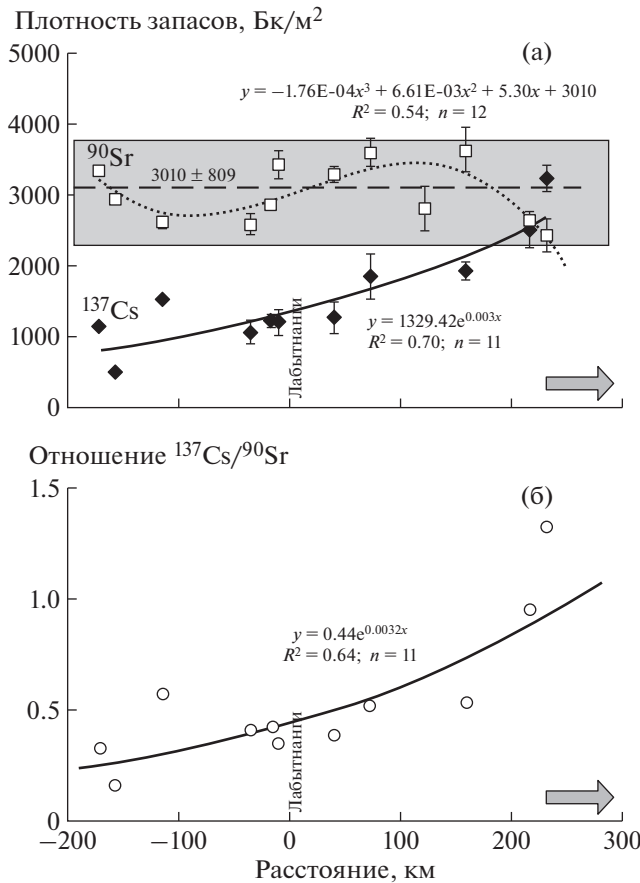


Рис. 5. Плотность запасов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (а) в пойме исследованных створов Оби и изотопное отношение  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  (б).

$$+ 6.61 \times 10^{-3} x^2 + 5.30x + 3010;$$

$$R^2 = 0.54; \quad n = 12;$$

$$F_{\text{факт}} = 3.130 < F_{\text{крит}}(0.05, 3.8) = 4.066; \quad (5)$$

$$\{\text{однако } F_{\text{факт}} = 3.130 > F_{\text{крит}}(0.1, 3.5) = 2.924 \text{ при } \alpha = 0.1\}.$$

среднее значение  $3010 \pm 809$ .

$$^{137}\text{Cs} \text{ (Бк/м}^2\text{)} = 1329.42e^{0.0032x}; \quad (6)$$

$$R^2 = 0.70; \quad n = 11;$$

$$F_{\text{факт}} = 21.0 > F_{\text{крит}}(0.05, 1.9) = 5.117,$$

$$^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr} = 0.44e^{0.0032x}; \quad R^2 = 0.64; \quad n = 11; \quad (7)$$

$$F_{\text{факт}} = 16.070 > F_{\text{крит}}(0.05, 1.9) = 5.117.$$

Оценка интегральных запасов радионуклидов в 20-километровой пойме Нижней Оби на участке от протоки Илюшинская до Обской Губы (расстояния от  $-171$  км до  $+260$  км) дает следующие величины, Бк:

$$^{90}\text{Sr} = 10^6 \times 20 \int_{-171}^{260} 3010 dx = 2.59 \times 10^{13}, \quad (8)$$

$$^{137}\text{Cs} = 10^6 \times 20 \int_{-171}^{260} 1329.42 e^{0.0032x} dx = 1.4 \times 10^{13}. \quad (9)$$

Таким образом, общая оценка запасов радионуклидов в 20-километровой пойме на участке Нижней Оби от створа протока Илюшинская до Обской Губы составляет  $2.6 \times 10^{13}$  Бк для  $^{90}\text{Sr}$  и  $1.4 \times 10^{13}$  Бк для  $^{137}\text{Cs}$ . Отметим, что полученная оценка запасов для  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  примерно в 5.1 и 4.2 раза превышает рассчитанную ранее величину годовых стоков этих радионуклидов в створе Лабытнанги ( $5.0 \times 10^{12}$  Бк и  $3.4 \times 10^{12}$  Бк соответственно).

График изменений плотности запасов радионуклидов в донных отложениях (рис. 6) демонстрирует возрастающий характер данного параметра по течению Оби. Исследования показывают, что плотности запасов радионуклидов в донных отложениях подвержены более сильной вариации, чем в пойме, вследствие чего тренды зависимостей имеют более низкие значения  $R^2$ . Наиболее высокое значение плотности запасов  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях зарегистрировано в протоке Кривая Обь —  $14700$  Бк/м<sup>2</sup>, явно выпадающее из общего тренда. Аналогично, для  $^{137}\text{Cs}$  выпадают из общего возрастающего тренда самые низкие величины  $1470$  и  $2070$  Бк/м<sup>2</sup>, зарегистрированные в протоках около о. Пуйко и Неупенский Сор.

Эмпирические модели продольных профилей плотности запасов радионуклидов в донных отложениях и результаты  $F$ -тестов Фишера, показывающие адекватность моделей, даны ниже:

$$^{90}\text{Sr} \text{ (Бк/м}^2\text{)} = 3382.7e^{0.0031x}; \quad (10)$$

$$R^2 = 0.73; \quad n = 10;$$

$$F_{\text{факт}} = 21.63 > F_{\text{крит}}(0.05, 1.8) = 5.318,$$

$$^{137}\text{Cs} \text{ (Бк/м}^2\text{)} = 10.438x + 4178.1; \quad (11)$$

$$R^2 = 0.87; \quad n = 10;$$

$$F_{\text{факт}} = 53.54 > F_{\text{крит}}(0.05, 1.8) = 5.318,$$

$$^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr} = -2.87 \times 10^{-7} x^3 + 2.38 \times 10^{-5} x^2 + 1.13 \times 10^{-2} x + 1.02; \quad (12)$$

$$R^2 = 0.76; \quad n = 12;$$

$$F_{\text{факт}} = 8.444 > F_{\text{крит}}(0.05, 3.8) = 4.066.$$

Оценка интегральных запасов радионуклидов в донных отложениях нижней Оби с условной шириной русла реки 3 км на участке от протоки Илюшинская до Обской Губы (расстояния от  $-171$  км до  $+260$  км) дает следующие величины, Бк:

$${}^{90}\text{Sr} = 10^6 \times 3 \int_{-171}^{260} 3382.7e^{0.0031x} dx = 5.4 \times 10^{12}, \quad (13)$$

$${}^{137}\text{Cs} = 10^6 \times 3 \int_{-171}^{260} (10.438x + 4178.1) dx = 6.0 \times 10^{12}. \quad (14)$$

Полученная оценка запасов  ${}^{90}\text{Sr}$  и  ${}^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях на исследуемом участке сопоставима с годовым стоком этих радионуклидов в створе Лабытнанги ( $5.0 \times 10^{12}$  Бк и  $3.4 \times 10^{12}$  Бк соответственно) и в 3–5 раз меньше приведенной ранее расчетной величины запасов этих радионуклидов в пойме ( $2.6 \times 10^{13}$  Бк для  ${}^{90}\text{Sr}$  и  $1.4 \times 10^{13}$  Бк для  ${}^{137}\text{Cs}$ ).

Суммарные запасы радионуклидов в пойме и донных отложениях обследованного участка реки составляют:  ${}^{90}\text{Sr} - 3.0 \times 10^{13}$  Бк,  ${}^{137}\text{Cs} - 2.0 \times 10^{13}$  Бк.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что характер распределения  ${}^{90}\text{Sr}$  и  ${}^{137}\text{Cs}$  на обследованном участке Нижней Оби существенно различается. Продольное распределение  ${}^{90}\text{Sr}$  в воде характеризуется отсутствием выраженных изменений по течению реки. При этом удельная активность  ${}^{90}\text{Sr}$  в воде, претерпевая естественные локальные вариации, в целом следует постоянному горизонтальному тренду вдоль течения, соответствующему среднему значению  $0.015 \pm 0.005$  Бк/л. Это означает, что почти весь радиоактивный стронций, поступающий по Оби, находясь в установившемся динамическом равновесии с запасами в пойме, транзитом проходит весь протяженный и разветвленный участок Нижней Оби, практически без потерь достигает крайних створов и далее переносится в Обскую Губу. Ситуация с  ${}^{137}\text{Cs}$  принципиально отличается, объемная активность данного радионуклида в воде монотонно снижается на всем протяжении исследованного участка. Содержание  ${}^{137}\text{Cs}$  в воде от входного створа (протока Илюшинская) до завершающего (протока Большая Наречинская) уменьшается в 12 раз. Это объясняется разными миграционными характеристиками радионуклидов. Высокая миграционная подвижность  ${}^{90}\text{Sr}$  в речных системах обеспечивается его хорошей растворимостью в воде и слабым удержанием донными отложениями и почвой. В отличие от  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$  легко сорбируется и удерживается донными отложениями и пойменными почвами. Это наглядно подтверждается распределением запасов  ${}^{137}\text{Cs}$  в пойменных почвах и донных отложениях. Плотность запасов  ${}^{137}\text{Cs}$  на исследованном участке поймы Оби параболически возрастает вниз по течению, увеличи-

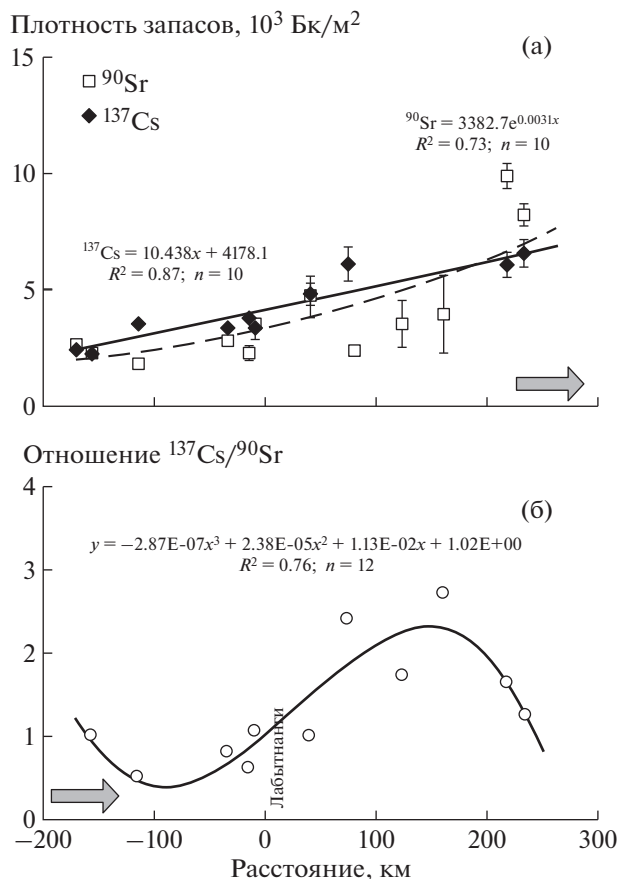


Рис. 6. Плотность запасов  ${}^{137}\text{Cs}$  и  ${}^{90}\text{Sr}$  (а) в донных отложениях исследованных створов Оби и изотопное отношение  ${}^{137}\text{Cs}/{}^{90}\text{Sr}$  (б).

ваясь от  $\sim 1000$  до  $\sim 3000$  Бк/м<sup>2</sup>. Плотность запасов радионуклидов в донных отложениях также характеризуется нарастающей динамикой. Изотопное отношение  ${}^{137}\text{Cs}/{}^{90}\text{Sr}$  в пойменных почвах фактически повторяет профиль распределения  ${}^{137}\text{Cs}$ , возрастая от 0.25 на входном створе (протока Илюшинская) до 1.0–1.3 в конечных створах (ближе к Обской Губе). Изотопное отношение  ${}^{137}\text{Cs}/{}^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях имеет более сложный профиль, но в целом величины изотопных отношений показывают более высокие значения в створах, расположенных ниже Лабытнанги.

Таким образом, участок Нижней Оби перед Обской Губой с его многочисленными протоками, старицами и обширной заболоченной поймой является для  ${}^{137}\text{Cs}$  естественным природным фильтром, где происходит его осаждение и депонирование в пойменных почвах и донных отложениях.

Суммарные запасы радионуклидов в пойме и донных отложениях на обследованном участке Нижней Оби протяженностью 431 км составили:  ${}^{90}\text{Sr} - 3.0 \times 10^{13}$  Бк,  ${}^{137}\text{Cs} - 2.0 \times 10^{13}$  Бк, что в 5.3 и

5.0 раз соответственно выше годовых стоков данных радионуклидов с водой в створе Лабытнанги.

Ранее, в ряде обобщающих работ [13, 14] на основании результатов натурных исследований было показано, что основным депо радионуклидов в пресноводных озерах и водохранилищах являются донные отложения водоемов, а в реках — это пойменные почвы и донные отложения пойменных водоемов, которые поглощают до 80% и более нуклидов, затем следует водная компонента (в пределах от долей процента до 20%) и, наконец, гидробионты (так, высшие водные растения могут аккумулировать в общей сложности доли процента от суммарной активности в водоеме).

Результаты исследований в границах ЯНАО очень информативно сравнить с аналогичными данными, полученными при проведении многолетних исследований (2004–2010 гг.) Обь-Иртышской речной системы в границах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) [4]. Так, средний годовой сток в створе, расположенном в 65 км ниже слияния Иртыша с Обью, составил по  $^{90}\text{Sr}$  —  $5.09 \times 10^{12}$  Бк, по  $^{137}\text{Cs}$  —  $5.73 \times 10^{11}$  Бк, при среднем расходе воды  $330 \text{ км}^3$  в год. В створе, расположенном в 10 км выше г. Лабытнанги, годовой сток составил  $5.0 \times 10^{12}$  Бк по  $^{90}\text{Sr}$  и  $3.4 \times 10^{12}$  Бк по  $^{137}\text{Cs}$  при среднем многолетнем стоке воды  $394 \text{ км}^3$  в год. Таким образом, годовой сток воды в створе Лабытнанги примерно в 1.2 раза выше, чем в ХМАО, а годовой сток  $^{90}\text{Sr}$  практически одинаков. При этом годовой сток  $^{137}\text{Cs}$  в створе Лабытнанги в 5.9 раза выше, чем в ХМАО. Поэтому есть основание предположить, что имеют место вымывание и перенос  $^{137}\text{Cs}$  из поймы и донных отложений Оби с территории, расположенной между створами в ХМАО и ЯНАО.

Сравнительная оценка интегральных запасов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в пойме обследованного участка Нижней Оби с аналогичными данными для Оби в границах ХМАО, где средние значения за период 2004–2010 гг. составили соответственно  $1.07 \times 10^{13}$  Бк и  $3.34 \times 10^{12}$  Бк [4], показывает, что запасы радионуклидов в Нижней Оби ( $2.6 \times 10^{13}$  Бк и  $1.4 \times 10^{13}$  Бк соответственно) в 2.4 и 4.2 раза превышают таковые в речной системе в границах ХМАО.

## ВЫВОДЫ

1. Представлены данные по содержанию  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде, донных отложениях и пойменных почвах Нижней Оби. Приведены эмпирические модели, описывающие закономерности горизонтального распределения радионуклидов в воде, пойменных почвах и донных отложениях вдоль течения реки.

2. Объемная активность трития и  $^{137}\text{Cs}$  в воде Нижней Оби на три порядка величин ниже уровня вмешательства,  $^{90}\text{Sr}$  на два порядка величин ниже уровня вмешательства, предусмотренного Нормами радиационной безопасности (НРБ-99/2009) для питьевой воды.

3. Продольное распределение  $^{90}\text{Sr}$  характеризуется отсутствием существенных изменений по течению реки, объемная активность данного радионуклида в большинстве створов варьирует в диапазоне 0.01–0.02 Бк/кг при среднем значении  $0.015 \pm 0.005$  Бк/кг. Объемная активность  $^{137}\text{Cs}$  в воде монотонно снижается на всем протяжении исследованного участка. Соответственно изотопное отношение  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  в воде Оби снижается от значений, близких к единице на входных створах, до значений 0.2 и ниже для створов, расположенных ближе к Обской Губе.

4. Расчетные величины запасов  $^{90}\text{Sr}$  в пойменных почвах варьируют около среднего значения  $3010 \pm 809$  Бк/м<sup>2</sup>, в то время как плотность запасов  $^{137}\text{Cs}$  на исследованном участке поймы Оби экспоненциально возрастает вниз по течению, достигая в конечных створах уровней, характерных для  $^{90}\text{Sr}$ .

5. Общая оценка запасов радионуклидов в 20-километровой пойме на участке Нижней Оби от створа протока Илюшинская до Обской Губы составляет  $2.6 \times 10^{13}$  Бк для  $^{90}\text{Sr}$  и  $1.4 \times 10^{13}$  Бк для  $^{137}\text{Cs}$ . Суммарные запасы радионуклидов в пойме и донных отложениях обследованного участка реки составляют:  $^{90}\text{Sr}$   $3.0 \times 10^{13}$  Бк,  $^{137}\text{Cs}$   $2.0 \times 10^{13}$  Бк.

6. Сравнительная оценка интегральных запасов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в пойме обследованного участка Нижней Оби с аналогичными данными для Оби в границах ХМАО показывает, что запасы радионуклидов в Нижней Оби в 2.4 и 4.2 раза превышают таковые в речной системе в границах ХМАО.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Организация экспедиции, отбор проб материала, измерение концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в воде, донных отложениях, пойменных почвах, а также интерпретация результатов выполнены при поддержке проекта Комплексной программы УрО РАН №18-9-4-9. Пробоподготовка и определение  $^{90}\text{Sr}$  выполнены в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заключение комиссии по оценке экологической ситуации в районе деятельности ПО “Маяк” Минатомэнергопрома СССР, организованной распоряжением Президиума АН СССР № 1140-501 от 12.06.1990 г.



2. Заключение комиссии под председательством вице-президента АН СССР О.М. Нефедова, организованной распоряжением Президента СССР № РП-1283 от 3 января 1991 г., по экологической и радиоэкологической обстановке в Челябинской области.
3. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Энергетическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ, 2010. 496 с.
4. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. Т. 1 / Под ред. И.М. Донник. Екатеринбург: Изд-во "АкадемНаука", 2014. 496 с.
5. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. Т. 2 / Под ред. И.М. Донник. Екатеринбург, Изд-во "АкадемНаука", 2016. 480 с.
6. Методика измерений удельной активности естественных и техногенных радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  в твердых сыпучих пробах гамма-спектрометрическим методом с использованием полупроводниковых детекторов. Свидетельство № 40181.3Г192/01.00294-2010. Номер в Федеральном Реестре Росстандарта: ФР.1.40.2013.15401.
7. Методика измерений объемной активности стронция-90 в пробах природных вод (пресноводных и минерализованных) бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. Свидетельство № 40074.4Ж212/01.00294-2010. Номер в Федеральном Реестре Росстандарта: ФР.1.40.2014.18554.
8. Методика измерений объемной активности стронция-90 в пробах почв, грунтов, донных отложений и горных пород бета-радиометрическим методом с радиохимической подготовкой. Свидетельство № 40181.3Г175/01.00294-2010. Номер в Федеральном Реестре Росстандарта: ФР.1.40.2013.15383.
9. Методика измерений объемной активности цезия-137 природных вод (пресноводных и минерализованных) гамма-спектрометрическим методом с предварительным концентрированием. Свидетельство № 40073.3Г189/01.00294-2010. Номер в Федеральном Реестре Росстандарта: ФР.1.40.2013.15398.
10. Чиркова В.Г. О методах концентрирования при измерении трития в природных водах // Тр. Ин-та экспериментальной метеорологии. 1974. Вып. 3 (42). С. 105.
11. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
12. Чеботина М.Я., Николкин О.А. Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе / Под ред. В.Н. Большакова. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 80 с.
13. Трапезников А.В. Радиоэкология пресноводных экосистем (на примере Уральского региона): Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2001. 48 с.
14. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. Пресноводная радиоэкология / Под ред. И.М. Донник. Екатеринбург: Изд-во "АкадемНаука", 2012. 544 с.

## Distribution of Radionuclides in Water, Bottom Sediments and Bottomland Soils of the Lower Ob-River in the Boundaries of the Yamalo-Nenetskiy Autonomous District

A. V. Trapeznikov<sup>a,#</sup>, V. N. Nikolkin<sup>a</sup>, A. V. Korzhavin<sup>a</sup>, and V. N. Trapeznikova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Sciences, Ural Branch, Ekaterinburg, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: bfs\_zar@mail.ru*

This study presents the data on the  $^3\text{H}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  content in water, bottom sediments and bottomland soils of the Lower Ob-river, covering the observation period of 2014–2016. Empirical models describing the longitudinal regularities of the radionuclide distribution in water, bottomland soils and bottom sediments along the river are given. The estimation of the radionuclide stock in the bottomland soils and bottom sediments of the surveyed site is carried out. It is shown that nearly all the  $^{90}\text{Sr}$  inflow coming to the Ob-river transits through the entire section of the Lower Ob-river and is transferred to Obskaya Guba practically without a loss. The concentration activity of  $^{137}\text{Cs}$  in the water decreases monotonically throughout the investigated section. At the same time, the density of  $^{137}\text{Cs}$  in the bottomland soils exponentially increases downstream, which indicates the processes of  $^{137}\text{Cs}$  fixation from the water component by the bottomland soils and bottom sediments due to the  $^{137}\text{Cs}$  low migration capacity. At present, a significant volume of the radionuclides has been deposited in the Lower Ob-river, the total stock of which in the bottomland and bottom sediments over a section of 431 km in length is estimated as  $3.0 \times 10^{13}$  Bq for  $^{90}\text{Sr}$  and  $2.0 \times 10^{13}$  Bq for  $^{137}\text{Cs}$ .

**Keywords:** radionuclide, water, bottomland sediments, migration, empirical models, integral store, Ob-river