

# Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River

Short communication

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Bolsunovsky A.Ya.\*, Vakhrushev V.I., Dementyev D.V.

*Institute of Biophysics FRC KSC Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademgorodok, 50-50, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

**ABSTRACT.** Large-scale research of the Yenisei River sediments that has been conducted in the area affected by the MCC of Rosatom over a long distance, up to 1580 km downstream of Krasnoyarsk, has revealed the presence of various artificial radionuclides, thus making it possible to calculate sedimentation rates by using different radioisotope techniques. Retrospective analysis shows that in the past 60 years, considerable activities of the artificial radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{152}\text{Eu}$  entered the sediments of the river from the MCC-affected area during the anomalous floods in 1966 and 1988 and  $^{60}\text{Co}$  – during the 2006 flood. To explain the radionuclide peaks in the layers dated to other periods, additional sediment research is needed.

**Keywords:** sediments, the Yenisei River, artificial radionuclides, sedimentation rate, chronology

**For citation:** Bolsunovsky A.Ya., Vakhrushev V.I., Dementyev D.V. Retrospective analysis of the deposition of artificial radionuclides in sediments of the Yenisei River // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 274-279. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-274

## 1. Introduction

Radioecological monitoring shows that sediments of the Yenisei River are contaminated by artificial radionuclides from the Mining-and-Chemical Combine (MCC) of Rosatom and global fallouts. Analytical studies of sediments from the near (15 km) and far (up to 1500 km) zones affected by the MCC detected a wide range of artificial radionuclides and radioactive particles (Bolsunovsky, 2010; Bolsunovsky et al., 2017). The analysis of the vertical distribution of radionuclides in the layers of sediment cores collected in the MCC-affected areas revealed peaks of  $^{137}\text{Cs}$  and other radionuclides, which could be formed during the heavy floods in the Yenisei River (Sukhorukov et al., 2004; Bolsunovsky, 2010; Vakhrushev et al., 2023). During the floods, the large water discharge through sluices of the Krasnoyarsk Power Plant resulted in flooding of the river plain and riverside villages, including the MCC riverside zone. As the river flow rate increased during the flood, radioactive sediments were transferred from the floodplain zone at the MCC downstream, over considerable distances (Bolsunovsky et al., 2021; Vakhrushev et al., 2023). However, the dating of sediment layers is a necessary procedure to determine more accurately the periods when peaks of artificial radionuclides

were formed in sediments. The purpose of the present study was to analyze the spatial distribution of artificial radionuclides in the Yenisei River sediments and to reconstruct the chronology of deposition of radionuclides in the sediments using radioisotope techniques.

## 2. Materials and methods

Sediment cores used in the study were collected from the Yenisei River floodplain in the MCC-affected area, stretching as far as 1580 km downstream of Krasnoyarsk (close to the Arctic Circle). Sediment cores collected at the village of Balchug (15 km downstream of the MCC discharge point – about 97 km downstream of Krasnoyarsk) represent sediments of the near MCC-affected zone. Sediment cores collected at the villages of Zakharovka, Novonazimovo, Komsa, and Kureika (272 to 1580 km downstream of Krasnoyarsk) represent sediments of the far MCC-affected zone. The cores were collected using steel corers – 11-cm diameter pipes of different lengths, with flap valves. Sediment cores were cut into 2-4-cm layers at the sampling site. In laboratory, the dried sediment samples were analyzed for the artificial radionuclides  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ , and  $^{154}\text{Eu}$  and the natural radionuclides  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{214}\text{Pb}$  using a GX2320 Canberra  $\gamma$ -spectrometer (U.S.) with

\*Corresponding author.

E-mail address: [radecology@gmail.com](mailto:radecology@gmail.com) (A.Ya. Bolsunovsky)

**Received:** May 30, 2024; **Accepted:** June 28, 2024;

**Available online:** August 26, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



a hyper-pure germanium detector. Sedimentation rates were determined using the  $^{210}\text{Pb}$  method, the ratios of artificial radionuclides, and the method of reference radionuclides.

### 3. Results and discussion

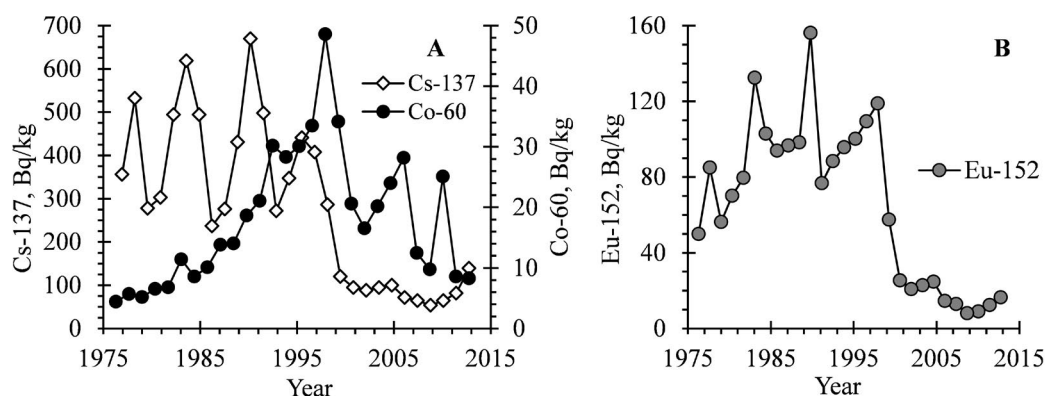
Analysis of sediment cores revealed 2 to 3 maxima of artificial radionuclides along the cores from the near MCC-affected zone (the village of Balchug) and 4 to 5 peaks of artificial radionuclides in the cores from the far MCC-affected zone (the villages of Zakharovka, Novonazimovo, and Komsa). The length of the cores collected in the far MCC-affected zone reached 140 cm. Some of the cores contained layers with abnormally high activity concentrations of the artificial radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  (up to 25000 Bq/kg), which corresponded to the low-activity radioactive wastes. Those layers were formed during the extreme flooding in 1966, which transported large masses of sediments from the MCC area to the town of Yeniseisk (410 km downstream of Krasnoyarsk) and, probably, farther downstream. Sediment layers with anomalous maxima of  $^{137}\text{Cs}$ , under certain conditions, can serve as reference markers for the date of the 1966 flood (Bolsunovsky et al., 2021).

The upper layers of the sediment cores collected after the 2006 flood contained increased activity concentrations of  $^{60}\text{Co}$ , which was also present in the form of radioactive microparticles. Those microparticles were detected in both the near and far MCC-affected zones (the village of Komsa), as far as 945 km downstream of Krasnoyarsk. The increased  $^{60}\text{Co}$  activity concentrations in the upper sediment layers resulting from the 2006 flood can serve as the marker of the date (2006) for calculating sedimentation rates. Hence, for many of the sediment cores collected from the Yenisei River downstream of the MCC discharge point, there are two reference radionuclides marking flood dates:  $^{60}\text{Co}$  in the upper part of the core (the 2006 flood) and, under certain conditions,  $^{137}\text{Cs}$  in the lower part of the core (the 1966 flood).

Analysis of the sediment cores collected close to the MCC (the village of Balchug) showed that sedimentation rates calculated using the radionuclide ratio ( $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$  and  $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ ) method ranged between 0.5 and 1.3 cm/year. That range was close to the range

of sedimentation rates obtained for the reference section of the river (upstream of the MCC) using the  $^{210}\text{Pb}$  method (0.5–1.0 cm/year) (Vakhrushev et al., 2023). For the areas far away from the MCC, sedimentation rates calculated using the radionuclide ratio method ranged between 2.0 and 3.5 cm/year, and they were higher than the sedimentation rates obtained for the near zone, at the village of Balchug. The higher sedimentation rates in the areas located farther from the MCC may be caused by changes in hydrological conditions downstream of the confluences of large tributaries (the Kan River, the Angara River, and other rivers). The sedimentation rates in the far section of the river calculated using the method of reference radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  (the 1966 flood) and  $^{60}\text{Co}$  (the 2006 flood) were generally similar to the rates obtained using the  $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$  ratio method.

The calculated sedimentation rates can be used to reconstruct the chronology of deposition of  $^{137}\text{Cs}$  and other radionuclides in the Yenisei sediments. As an example, Figure 1 shows chronology of deposition of artificial radionuclides in the sediments at the village of Zakharovka, 272 km downstream of Krasnoyarsk. For that core, similar sedimentation rates were obtained by using the  $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$  ratio (2.3 cm/year) and the reference radionuclide  $^{60}\text{Co}$  (2.2 cm/year). The maximal activity concentrations of  $^{137}\text{Cs}$  in that core were formed in the layers of 1976-77, 1982-84, 1988-91, and 1994-1997 (Fig. 1A). One of the  $^{137}\text{Cs}$  peaks (1988-91) was evidently associated with the heavy flood in the Yenisei in 1988. The  $^{60}\text{Co}$  maxima in the sediment layers of that region were formed in 1995-98, 2006, and 2010. One of the  $^{60}\text{Co}$  peaks (2006) was definitely associated with the major flood in 2006. The main maxima of  $^{152}\text{Eu}$  (Fig. 1B) in sediment layers of that region were formed in 1976-77, 1982-84, 1990, and 1994-1998, completely coinciding with the dates of formation of  $^{137}\text{Cs}$  peaks (Fig. 1A). Analysis demonstrated that one of the  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{152}\text{Eu}$  peaks in that region was associated with the 1988 flood while one of the  $^{60}\text{Co}$  peaks – with the 2006 flood. However, the  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{152}\text{Eu}$  maxima in the sediment layers dated to 1976-77, 1982-84, and 1994-1997 and the  $^{60}\text{Co}$  maxima in the layers dated to 1995-98 and 2010 cannot be attributed to the effects of the major floods. These maxima may be associated with unrecorded discharges from the MCC and changes



**Fig.1.** Chronology of deposition of the artificial radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  (A) and  $^{152}\text{Eu}$  (B) in sediments of the Yenisei River in the region far downstream of the MCC, at the village of Zakharovka.

in the hydrological conditions in this remote section of the river. Some of the lower layers of sediment cores contained microparticles with  $^{137}\text{Cs}$  and the transuranium element  $^{241}\text{Am}$ , which can be used in the future studies to understand the occurrences of the maxima of artificial radionuclides in sediments.

#### 4. Conclusions

Sediment cores collected from the Yenisei River close to the MCC (15 km) contained 2 to 3 peaks of artificial radionuclides along the core; the cores collected in the far MCC-affected zone (up to 1500 km downstream), which were up to 140 cm long, contained 4 to 5 maxima of radionuclides. The sedimentation rates calculated for the regions far away from the MCC (2.0 to 3.5 cm/year) were higher than the rates obtained for the near MCC-affected zone (0.5–1.3 cm/year). The reconstructed chronology of deposition of artificial radionuclides in the Yenisei River sediments demonstrated that in the past 60 years, considerable activities of the artificial radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{152}\text{Eu}$  entered the sediments of the river from the MCC-affected area during the anomalous floods in 1966 and 1988 and  $^{60}\text{Co}$  – during the 2006 flood. More sediment cores need to be collected and studied to explain the occurrences of the radionuclide peaks in the layers dated to 1976-77, 1982-84, and 1994-1997.

#### Acknowledgements

The study was partly supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-27-20003) and the Krasnoyarsk Regional Fund of Science.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### References

- Bolsunovsky A.Ya. 2010. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River. *Chemistry and Ecology* 26: 401–409.
- Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A. et al. 2017. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain. *Scientific Reports* 7(11132): 1–10.
- Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. 2021. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event. *Doklady Earth Sciences* 498: 514–518.
- Sukhorukov F.V., Degermendzhy A.G., Belolipetsky V.M. et al. 2004. Distribution and migration of radionuclides in the Yenisei River Valley. Novosibirsk: Publ. House of SB RAS “Geo”. (in Russian).
- Vakhrushev V.I., Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V. 2023. The use of radioisotope techniques to date Cs deposition in bottom sediments of the Yenisei River. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle* [Bulletin of Udmurt University. Biology Series. Earth Sciences] 33(2): 178-190. (in Russian)

# Ретроспективный анализ поступления техногенных радионуклидов в донные отложения р. Енисей

Краткое сообщение

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Болсуновский А.Я.\* , Вахрушев В.И., Дементьев Д.В.

Институт биофизики ФИЦ КНЦ Сибирского отделения РАН, Академгородок, 50-50, Красноярск, 660036, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Масштабные исследования донных отложений (ДО) реки Енисей в зоне влияния деятельности ГХК Росатома на протяженном участке до 1580 км по течению реки от г.Красноярска выявили широкий перечень техногенных радионуклидов, позволяющих использовать разные радиоизотопные методы расчета скоростей осадконакопления. Ретроспективный анализ показал, что за последние 60 лет значительная часть техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  поступала в ДО реки из зоны ГХК во время аномальных паводков 1966 и 1988 годов,  $^{60}\text{Co}$  – во время паводка 2006 года. Существование максимумов радионуклидов в слоях, датированных другими периодами времени, требует дополнительных исследований ДО.

**Ключевые слова:** донные отложения, река Енисей, техногенные радионуклиды, скорость осадконакопления, хронология

Для цитирования: Болсуновский А.Я., Вахрушев В.И., Дементьев Д.В. Ретроспективный анализ поступления техногенных радионуклидов в донные отложения р. Енисей // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 274-279. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-274

## 1. Введение

Донные отложения (ДО) реки Енисей по данным радиоэкологического мониторинга загрязнены техногенными радионуклидами в результате деятельности Горно-химического комбината (ГХК) Росатома и глобальных выпадений. Аналитические исследования проб ДО ближней (15 км) и дальней зоны (до 1500 км) влияния ГХК зарегистрировали широкий перечень техногенных радионуклидов, а также радиоактивные частицы (Bolsunovsky, 2010; Bolsunovsky et al, 2017). Проведенный анализ вертикального распределения радионуклидов в слоях кернов ДО, отобранных в зоне влияния ГХК, выявил максимумы  $^{137}\text{Cs}$  и других радионуклидов, которые могли быть сформированы в периоды крупных паводков на р. Енисей (Сухоруков и др., 2004; Bolsunovsky, 2010; Вахрушев и др., 2023). Во время паводков большой расход воды через плотину Красноярской ГЭС приводил к затоплению поймы реки с прибрежными населёнными пунктами, включая береговую зону размещения ГХК. Возросшая во время паводка скорость течения реки привела к переносу радиоактивных донных отложений поймы реки из зоны вблизи ГХК на значительные расстояния по течению реки (Bolsunovsky

et al., 2021; Вахрушев и др., 2023). Однако для более точного установления временных периодов образования максимумом техногенных радионуклидов в ДО необходимо провести датировку слоев ДО. Цель настоящей работы – анализ пространственного распределения техногенных радионуклидов в ДО р. Енисей и хронологии поступления радионуклидов в ДО с использованием радиоизотопных методов.

## 2. Материалы и методы

Для исследований использовали керны ДО, отобранных в пойме реки Енисей в зоне влияния ГХК на расстоянии до 1580 км (вблизи Полярного круга) по течению реки от г. Красноярска. Керны ДО, отобранные вблизи села Балчуг (15 км по течению реки от ГХК – 97 км по течению реки от г. Красноярска), характеризуют ДО ближней зоны влияния ГХК. Керны ДО, отобранные вблизи сел Захаровка, Новоазимово, Комса, Курейка (на расстоянии от 272 до 1580 км от Красноярска) характеризуют ДО дальней зоны влияния ГХК. Для отбора использовали стальные пробоотборники – трубы разной длины с диаметром 11 см и лепестковым затвором. На месте пробоотбора керны ДО разрезали на слои по 2-4 см. В лаборатории высушенные пробы ДО

\*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [radecology@gmail.com](mailto:radecology@gmail.com) (А.Я. Болсуновский)

Поступила: 30 мая 2024; Принята: 28 июня 2024;

Опубликована online: 26 августа 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



анализировали на содержание техногенных радионуклидов  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  и природных  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  на  $\gamma$ -спектрометре GX2320 “Canberra” (USA) со сверхчистым германиевым детектором. Для расчета скорости осадконакопления использовали методы неравновесного  $^{210}\text{Pb}$ , отношения техногенных радионуклидов и метод реперных радионуклидов.

### 3. Результаты и обсуждение

Анализ кернов ДО выявил 2-3 максимума техногенных радионуклида по глубине керна в ближней зоне влияния ГХК (с. Балчуг) и 4-5 максимумов техногенных радионуклидов для кернов дальней зоны влияния ГХК (села Захаровка, Новоазимово и Комса). При этом длина отобранных кернов ДО дальней зоны достигала 140 см. Для отдельных кернов обнаружены слои аномального содержания техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  (до 25000 Бк/кг) в ДО р. Енисей по течению от ГХК, достигающего категории радиоактивных отходов низкой активности. Эти слои образовались в период мощного паводка на реке Енисей в 1966 году, перенесшего большие массы ДО из района вблизи ГХК до г. Енисейска (410 км от Красноярска) и, возможно далее по течению реки. Слои донных отложений с аномальными максимумами  $^{137}\text{Cs}$  при определенных условиях могут служить реперными маркерами даты паводка 1966 года (Bolsunovsky et al., 2021).

Для кернов ДО, отобранных после паводка 2006 года, в верхних слоях зарегистрировано повышенное содержание  $^{60}\text{Co}$ , в том числе в форме радиоактивных микрочастиц. Эти микрочастицы были обнаружены как в ближней, так и в дальней зоне влияния ГХК (с. Комса) на расстоянии до 945 км по течению реки от г. Красноярска. Повышенное содержание  $^{60}\text{Co}$  в верхних слоях кернов ДО, возникшее в период паводка 2006 года, может служить маркером даты (2006 г) для расчета скоростей осадконакопления. Следовательно, для многих кернов ДО р. Енисей после сбросов ГХК мы имеем два реперных радионуклида – маркера даты паводков:  $^{60}\text{Co}$  в верхней части керна (паводок 2006 год) и  $^{137}\text{Cs}$  в нижней части керна при определенных условиях (паводок 1966 год).

Анализ кернов ДО, отобранных вблизи ГХК (с. Балчуг), показал, что рассчитанные скорости осад-

конакопления методом отношения радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$  и  $^{152}\text{Eu}/^{154}\text{Eu}$ ) были в диапазоне 0.5–1.3 см/год. Этот интервал скоростей близок к интервалу скоростей осадконакопления, полученному для контрольного района реки (выше расположения ГХК) по методу неравновесного  $^{210}\text{Pb}$  (0.5–1.0 см/год) (Вахрушев и др., 2023). Для удаленных от ГХК районов рассчитанные скорости осадконакопления методом отношения радионуклидов были в интервале от 2.0 до 3.5 см/год, что превышали полученные значения скоростей для ближней зоны вблизи с. Балчуг. Возрастание скорости осадконакопления для удаленных от ГХК районов может быть связано с изменением гидрологических условий реки после впадения крупных притоков (рек Кан, Ангара и других). Использование метода реперных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  (паводок 1966 г) и  $^{60}\text{Co}$  (паводок 2006 г) для расчета скоростей осадконакопления удаленного участка реки в большинстве случаев соответствовало скоростям, полученным методом отношения  $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$ .

Рассчитанные скорости осадконакопления позволяют определить хронологию поступления  $^{137}\text{Cs}$  и других радионуклидов в ДО р. Енисей. В качестве примера на рисунке 1 приведена хронология поступления техногенных радионуклидов в ДО вблизи с. Захаровка на удалении 272 км от г. Красноярска. Для данного керна скорости осадконакопления, рассчитанные на основании отношения радионуклидов  $^{137}\text{Cs}/^{60}\text{Co}$  (2.3 см/год) и реперного  $^{60}\text{Co}$  (2.2 см/год) совпали. Как следует из рис. 1А, максимумы содержания  $^{137}\text{Cs}$  в слоях ДО этого района сформировались в 1976-77, 1982-84, 1988-91 и 1994-1997 годах. Один из максимумов  $^{137}\text{Cs}$  (1988-91) очевидно связан с крупным паводком на реке Енисей в 1988 году. Максимумы содержания  $^{60}\text{Co}$  в слоях ДО этого района сформировались в 1995-98, 2006 и 2010 годах. Один из максимумов  $^{60}\text{Co}$  (2006) однозначно связан с крупным паводком на реке в 2006 году (рис. 1А). Основные максимумы содержания  $^{152}\text{Eu}$  в слоях ДО (рис. 1В) этого района сформировались в 1976-77, 1982-84, 1990 и 1994-1998 года – полностью совпадают с временем формирования максимумов  $^{137}\text{Cs}$ . Проведенный анализ показал, что один из максимумов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в ДО данного района связан с паводком 1988 года, а один из максимумов  $^{60}\text{Co}$  – с паводком на реке

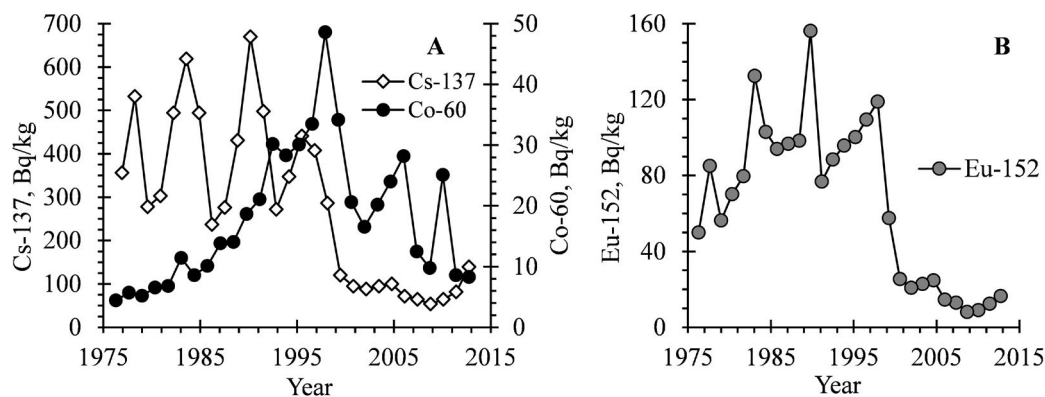


Рис.1. Пример хронологии поступления техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  (А), и  $^{152}\text{Eu}$  (В) в донные отложения р. Енисей удаленного от ГХК района вблизи с. Захаровка.

в 2006 году. Однако другие максимумы поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  в слои ДО датированные 1976-77, 1982-84, 1994-1997 годами, а также максимумы  $^{60}\text{Co}$  в ДО датированные 1995-98 и 2010 годами пока не могут быть объяснены влиянием крупных паводков на реке. Возможно, эти максимумы поступления радионуклидов в ДО связаны как с неизвестными сбросами ГХК, так и с измененными гидрологическими условиями реки на этом удаленном участке. В некоторых нижних слоях кернов ДО обнаружены микрочастицы, содержащие  $^{137}\text{Cs}$  и трансурановый элемент  $^{241}\text{Am}$ , которые в дальнейшем могут помочь с объяснением формирования максимумов техногенных радионуклидов в ДО.

#### 4. Заключение

Керны ДО р. Енисей вблизи ГХК (15 км) содержат 2-3 максимума техногенных радионуклидов по глубине, для дальней зоны влияния ГХК (до 1500 км) отмечены 4-5 максимумов радионуклидов в кернах, длиной до 140 см. Для удаленных от ГХК районов рассчитанные скорости осадконакопления (от 2.0 до 3.5 см/год) превышали полученные значения скоростей для ближней зоны влияния ГХК (0.5–1.3 см/год). Анализ хронологии поступления техногенных радионуклидов в ДО реки Енисей показал, что за последние 60 лет значительная часть техногенных радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{152}\text{Eu}$  поступала в ДО реки из зоны ГХК во время аномальных паводков 1966 и 1988 годов,  $^{60}\text{Co}$  – во время паводка 2006 года. Существование максимумов радионуклидов в других слоях, датированных 1976-77, 1982-84, 1994-1997 годами, требует дополнительного отбора и анализа новых кернов ДО.

#### Финансирование

Работа выполнена частично за счет средств гранта Российского научного фонда №24-27-20003, Красноярского краевого научного фонда.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

#### Список литературы

- Bolsunovsky A.Ya. 2010. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River. *Chemistry and Ecology* 26: 401–409.
- Bolsunovsky A., Melgunov M., Chuguevskii A. et al. 2017. Unique diversity of radioactive particles found in the Yenisei River floodplain. *Scientific Reports* 7(11132): 1–10.
- Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. 2021. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event. *Doklady Earth Sciences* 498: 514–518.
- Вахрушев В.И., Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В. 2023. Использование радиоизотопных методов для хронологии поступления Cs в донные отложения реки Енисей. *Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле* 33(2): 178-190.
- Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белоліпецкий В.М. и др. 2004. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал «Гео».