

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 502.057; 504.05

М.М. Иванов¹, О.Л. Комиссарова², Т.С. Кошовский³, А.С. Цыпленков⁴**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЕВОЙ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ И ДОЗИМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА ПОЙМЕ МАЛОЙ РАВНИННОЙ РЕКИ В ЗОНЕ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

В работе описан опыт применения портативного гамма-спектрометрического и дозиметрического оборудования при проведении крупномасштабного геоморфологического исследования участка поймы р. Локны, подвергшегося интенсивному радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС в 1986 г. Полученные результаты позволили в короткие сроки при низких трудозатратах выстроить подробную картину процесса пойменной аккумуляции на исследованном участке за пост-Чернобыльский период. Результаты измерений были проверены путем послойного отбора проб пойменных отложений и определения в них содержания радионуклидов в лабораторных условиях. Наиболее высокие темпы осадконакопления были зафиксированы на низкой пойме. Снижение концентрации радионуклидов в стоке наносов приводит к тому, что наиболее загрязненные слои оказываются захороненными под более чистыми слоями. Таким образом, проявляется процесс естественного самоочищения, который приводит к систематическому снижению мощности дозы гамма-излучения и как важный позитивный с радиозоологической точки зрения эффект должен быть учтен при прогнозировании ситуации.

Ключевые слова: Cs-137, радиоцезиевый метод, флювиальная геоморфология, Чернобыльское загрязнение

Введение. Реки представляют собой основной путь латеральной миграции радионуклидов на загрязненных территориях и за их пределами. В условиях интенсивной антропогенной нагрузки развитие флювиального рельефа оказывает серьезное воздействие на экологическую ситуацию [Дедков, Мозжерин, 1984]. Одной из наиболее актуальных проблем является ухудшение качества водных и земельных ресурсов, связанное с миграцией загрязнителей, попадающих в природную среду в результате хозяйственной деятельности или техногенных аварий [Ажигиров и др., 1988; Пацукевич и др., 1992; Golosov et al., 2000; Walling et al., 2003; Walling, Collins, 2008; Bird, 2011]. Закономерности формирования и перераспределения речного стока и стока наносов в частности являются определяющими факторами в пространственной трансформации радиоактивного загрязнения и возникновения новых радиозоологических угроз. Изучение отложений, образующихся в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения после момента аварии, является важным источником информации о перемещении радионуклидов в природной среде. Вместе с тем, ¹³⁷Cs выступает в качестве одного из основных маркеров [Handbook ...,

2002], используемых для исследования процессов миграции вещества. Такой подход может быть применен к поймам рек как сложным полигенетическим формированиям, фиксирующим сведения о вариациях содержания радионуклидов в стоке рек с загрязненными водосборами [Иванова и др., 2014; Мамихин и др., 2016].

Появление сравнительно компактных гамма-спектрометров позволило проводить измерение радиоактивности непосредственно в полевых условиях [Beck et al., 1972]. На современном этапе совокупность доступного аналитического оборудования позволяет получать как точные значения содержания радионуклидов в отбираемых образцах грунта в рамках лабораторных анализов, так и показатели формируемой ими мощности дозы гамма-излучения [Chesnokov et al., 1997; Potapov et al., 2001; Linnik et al., 2006]. Комбинация этих данных дает возможность выстроить расширенную картину процесса формирования поймы как геологического тела и накопителя радиоактивных загрязнителей.

Целью представленной работы являлась апробация методики применения полевой гамма-спектрометрии для получения сведений об аккумуляции

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., мл. науч. с.; e-mail: ivanovm@bk.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Почвенный факультет, Кафедра радиозоологии и экотоксикологии, аспирант, e-mail: komissarova-olga93@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., мл. науч. с.; e-mail: tkzv@ya.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, канд. геогр. н., мл. науч. с.; e-mail: atsyplenkov@gmail.com

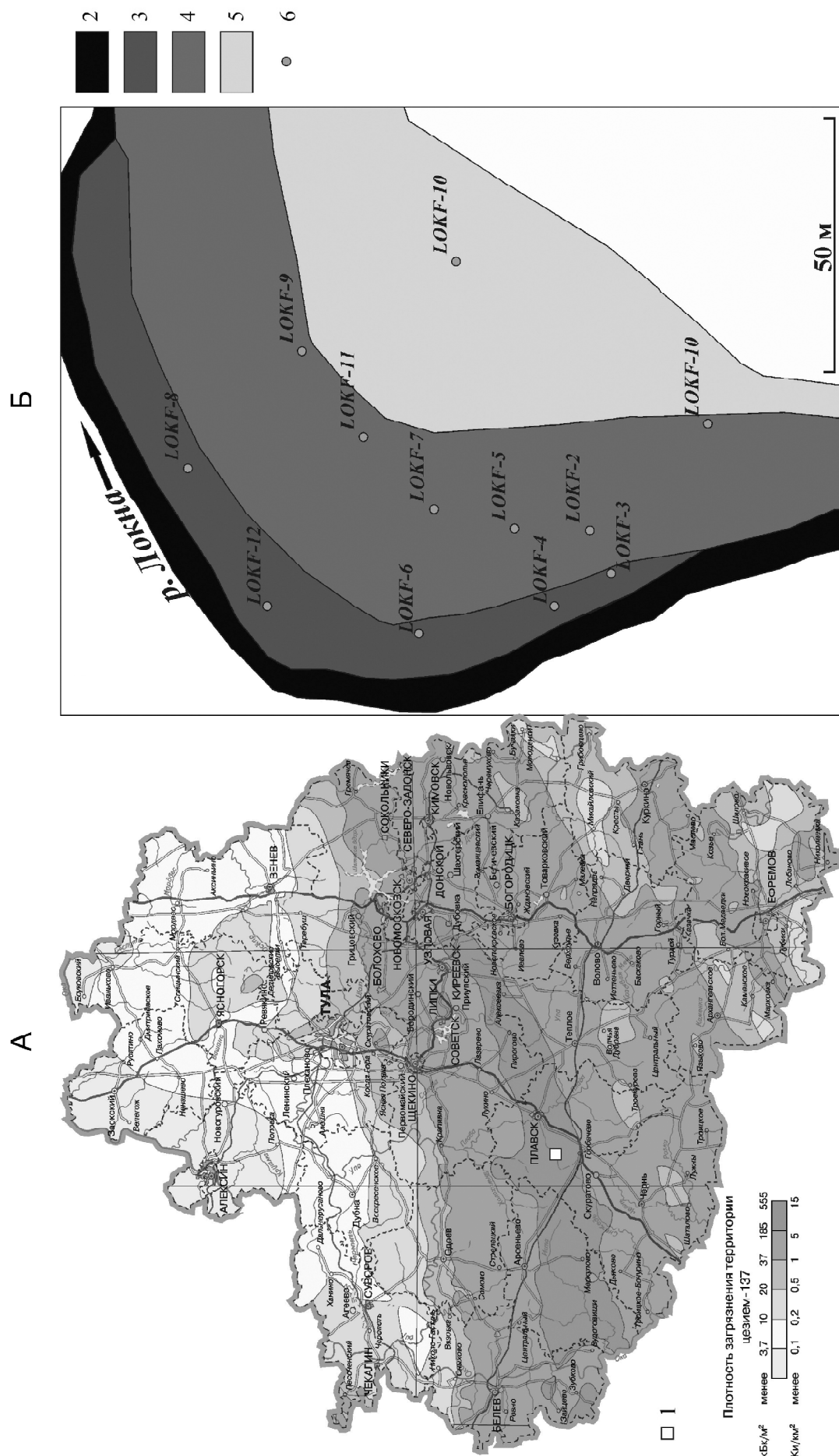


Рис. 1. Карта радиоактивного загрязнения Тульской области [Атлас ..., 2009] (А): 1 – расположение исследованного участка поймы р. Локны; схема исследованного участка (Б): 2 – русло реки, 3 – низкая пойма, 4 – средняя пойма, 5 – высокая пойма, 6 – расположение разрезов

Fig. 1 Map of radioactive contamination of the Tula Oblast [Atlas ..., 2009] (А): 1 – location of the studied section of the Lokna River floodplain; scheme of the studied section (Б): 2 – river channel, 3 – low floodplain, 4 – middle floodplain, 5 – high floodplain, 6 – location of cross-sections

наносов за пост-Чернобыльский период и систематических изменениях мощности дозы гамма-излучения. Для достижения поставленной цели были произведены полевые измерения интенсивности гамма-излучения и мощности дозы на участке поймы малой равнинной реки с радиоактивно загрязненным бассейном. Также был проведен отбор проб грунта для лабораторной обработки и проверки полевых измерений.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования послужил участок поймы р. Локны, бассейн которой расположен в южной части Тульской области на севере Среднерусской возвышенности, подвергшейся интенсивному радиоактивному загрязнению после аварии на ЧАЭС в 1986 г. (рис. 1А). Река Локна является левобережным притоком р. Плавы, впадая в нее в среднем течении в районе г. Плавска. Площадь бассейна р. Локны составляет 177 км². В строении поймы р. Локны выделяется три уровня: низкий, непосредственно примыкающий к руслу, высотой до 1 м над урезом воды, средний – высотой до 1,5 м, занимающий центральную часть поймы, и высокий – высотой более 1,7 м. Поверхность высокой поймы, примыкающая непосредственно к бортам долины, часто осложнена шлейфами и конусами выноса, сформировавшимися за счет поступления наносов непосредственно со склонов. Суммарная ширина низкой и средней пойм по всему течению Локны колеблется в диапазоне от 40 до 120 м. При этом низкая пойма на основном протяжении реки представлена достаточно узкой (максимум до 5–7 м) полосой вдоль русла, чаще всего фрагментарно по одному из берегов (см. рис. 1Б). Выбранный участок уже изучался в 2014 г. на предмет вертикального распределения ¹³⁷Cs в пойменных отложениях [Мамихин и др., 2016]. Характерной особенностью вертикального распределения ¹³⁷Cs на пойме р. Локны является наличие максимума содержания радионуклида, который может быть отнесен к моменту аварии – «Чернобыльский пик». Данный пик выступает в качестве надежного хронологического маркера, позволяющего оценить темпы осадконакопления за пост-Чернобыльский период.

На изучаемом участке поймы в 2019 г. проводился послыйный отбор проб (в точках 10, 11, 12) (см. рис. 1Б) для последующих лабораторных анализов. В лабораторных условиях образцы высушивались при температуре 105°C, затем перетирались и просеивались через сито с диаметром отверстий 2 мм. В подготовленных образцах содержание ¹³⁷Cs анализировалось с использованием гамма-спектрометрического комплекса СКС-07П(09П)_Г_Р производства компании ООО «ГринСтар» с относительной погрешностью определения удельной активности 5–10%.

Кроме этого, в стенках отдельных разрезов пойменных отложений были выполнены замеры активности ¹³⁷Cs *in situ* с помощью портативных спектрометров производства КБ «Радар» с детектором CsI(Tl) размером 13×1347 мм (8 см³) с кремниевым фотоумножителем. Разрешение по линии 662 кэВ

¹³⁷Cs – не хуже 7%, типовое значение 6–6,5% Atom Nano. На заданной глубине производилась выемка грунта для создания ниши, куда помещался спектрометр. Малый размер прибора (60×35×20 мм) позволял избегать сильных нарушений в стенке разреза. Измерения велись в течение 10 минут, что при имеющихся запасах ¹³⁷Cs оказывалось достаточным для регистрации статистически надежного количества импульсов.

Также на нескольких участках с морфологическими выраженными уровнями проводились множественные замеры мощности дозы гамма-излучения с помощью портативных дозиметров Atom Fast (КБ «Радар»). Энергетический диапазон регистрируемого гамма- и рентгеновского излучения – от 50 до 3000 кэВ. На точках отбора проб отложений и проведения полевой спектрометрии выполнялись замеры мощности дозы продолжительностью не менее 20 мин. Все измерения проходили на высоте 1 м над поверхностью поймы.

Для создания крупномасштабной схемы изучаемого участка (см. рис. 1Б) была проведена аэрофотосъемка при использовании БПЛА производства компании DJI, модель Mavic Pro.

Результаты и их обсуждение. Сопоставление результатов лабораторных исследований отобранных образцов пойменных отложений и полевых замеров интенсивности излучения ¹³⁷Cs в стенке обнажения, откуда был взят материал, показало, что в заданных условиях полевая спектрометрия дает вполне надежные данные для оценки относительного распределения запасов радионуклидов (рис. 2). Наиболее интенсивная аккумуляция и рост запасов ¹³⁷Cs наблюдаются на низкой пойме – 323 кБк/м² (см. рис. 2А), что было также описано в рамках работы, проводимой ранее на данном участке [Мамихин и др., 2016]. С ростом уровня поймы запасы ¹³⁷Cs уменьшаются: 252 кБк/м² на среднем уровне (см. рис. 2Б) и 186 кБк/м² на высокой пойме (см. рис. 2В).

Темпы пойменного осадконакопления и, соответственно, роста запасов радионуклидов на реках с таким режимом определяются, главным образом, продолжительностью затопления поверхности поймы в периоды высокой воды во время интенсивного весеннего снеготаяния. Продолжительность затопления во многом зависит от высоты уровня поймы. Таким образом, средние темпы осадконакопления должны находиться в обратной связи с гипсометрическим уровнем (рис. 3).

Интенсивность накопления наносов на низкой пойме закономерно возрастает по мере приближения к вершине излучины и падает на ее крыльях, вплоть до размыва (см. рис. 3: 2,3). При этом интенсивность аккумуляции на средней пойме остается практически одинаковой на всем протяжении изученного участка.

Закономерным результатом неоднородности накопления материала является неравномерность роста запасов ¹³⁷Cs, которые оказываются также выше на более низких гипсометрических уровнях. Вместе с этим наблюдается четкая обратная зави-

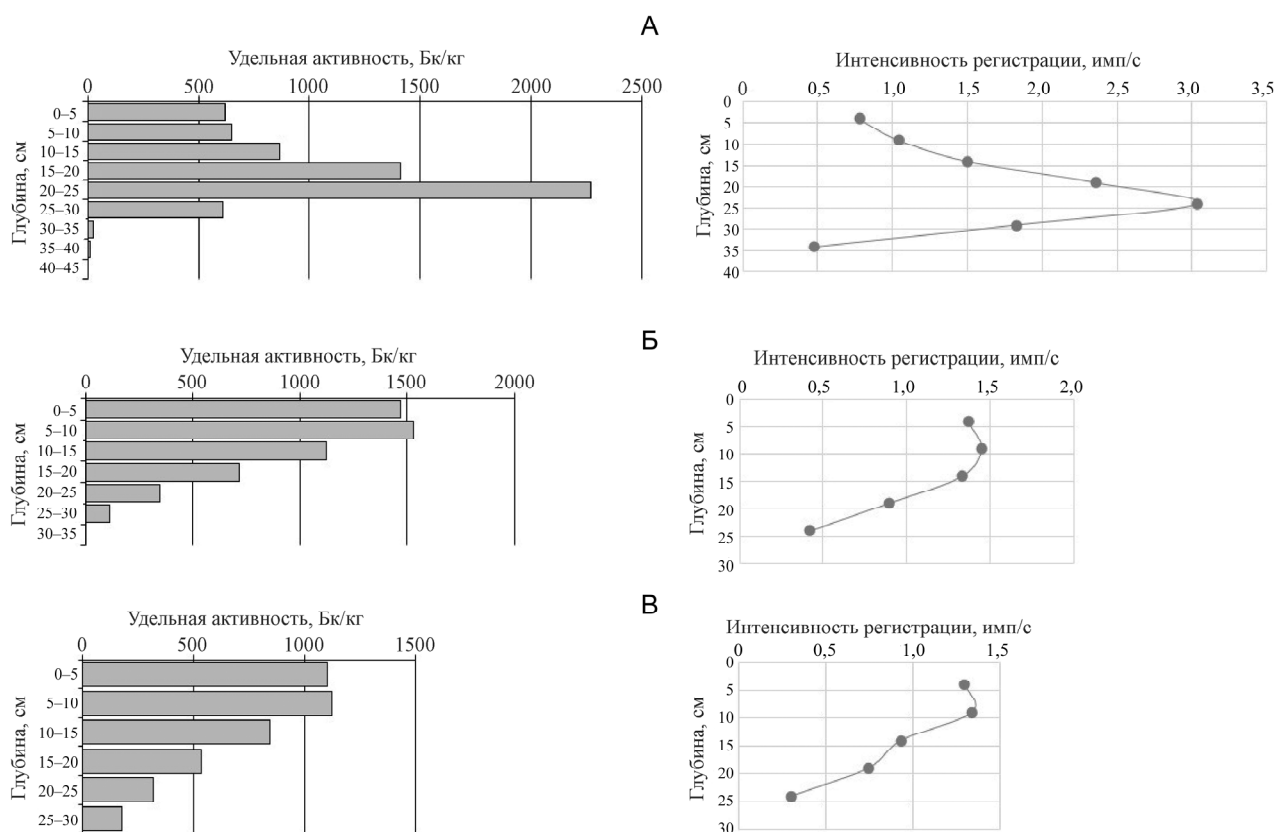


Рис. 2. Распределение ^{137}Cs в пойменных отложениях р. Локны: сопоставление графиков удельной активности ^{137}Cs (слева) и интенсивности полевой регистрации гамма-квантов ^{137}Cs (справа). Пойма: А – низкая (разрез 12), Б – средняя (разрез 11), В – высокая (разрез 10)

Fig. 2. Distribution of ^{137}Cs in floodplain sediments of the Lokna River: correlation of graphs of ^{137}Cs specific activity (left) and the intensity of field registration of ^{137}Cs gamma-quanta (right). Floodplain: А – low (cross-section 12), Б – middle (cross-section 11), В – high (cross-section 10)

симость между темпами осадконакопления и регистрируемой мощностью дозы (рис. 4А). Площадная дозиметрическая съемка показала, что на низкой пойме, где происходит более интенсивная аккумуляция наносов, мощность дозы радиоактивного излучения в среднем ниже (см. рис. 4Б).

Наблюдаемая ситуация коренным образом отличается от результатов исследований, проведенных на пойме р. Течи, где основным механизмом поступления радионуклидов в окружающую среду были не атмосферные выпадения, а их сброс в реку [Chesnokov et al., 2000]. При этом в обоих случаях рост запасов радионуклидов отмечается главным образом на низкой пойме. Проведенная ранее оценка показала, что, учитывая площади, занимаемые низким и средним уровнями поймы р. Локны, суммарный рост запасов ^{137}Cs составил 215×10^9 Бк (в расчете на 2012 г.) [Иванов, 2017]. Снижение концентрации радионуклидов в стоке наносов приводит к тому, что наиболее загрязненные слои оказываются захороненными под более чистыми слоями [Vetrov et al., 1990; Fridman et al., 1997; He, Walling,

1997; Golosov, Ivanova, 2002]. Таким образом, проявляется процесс естественного самоочищения (natural attenuation) [Konoplev et al., 2018], который должен быть учтен при прогнозировании радиоэкологической ситуации.

Выводы:

– опыт применения доступных в свободной продаже приборов для измерения содержания гамма-активных радионуклидов и формируемой ими мощности дозы излучения при проведении крупномасштабных геоморфологических исследований является крайне удачным. При сравнительно низких материальных и временных затратах в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения могут быть получены высокоинформативные данные о пространственной неоднородности развития процесса седиментации за пост-Чернобыльский период;

– в условиях сокращающегося числа высоких паводков наиболее интенсивная аккумуляция ожидается на низком уровне поймы р. Локны, что приводит к снижению мощности формируемой дозы и позитивным радиоэкологическим эффектам.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ – проект мол_a 18-35-00654.

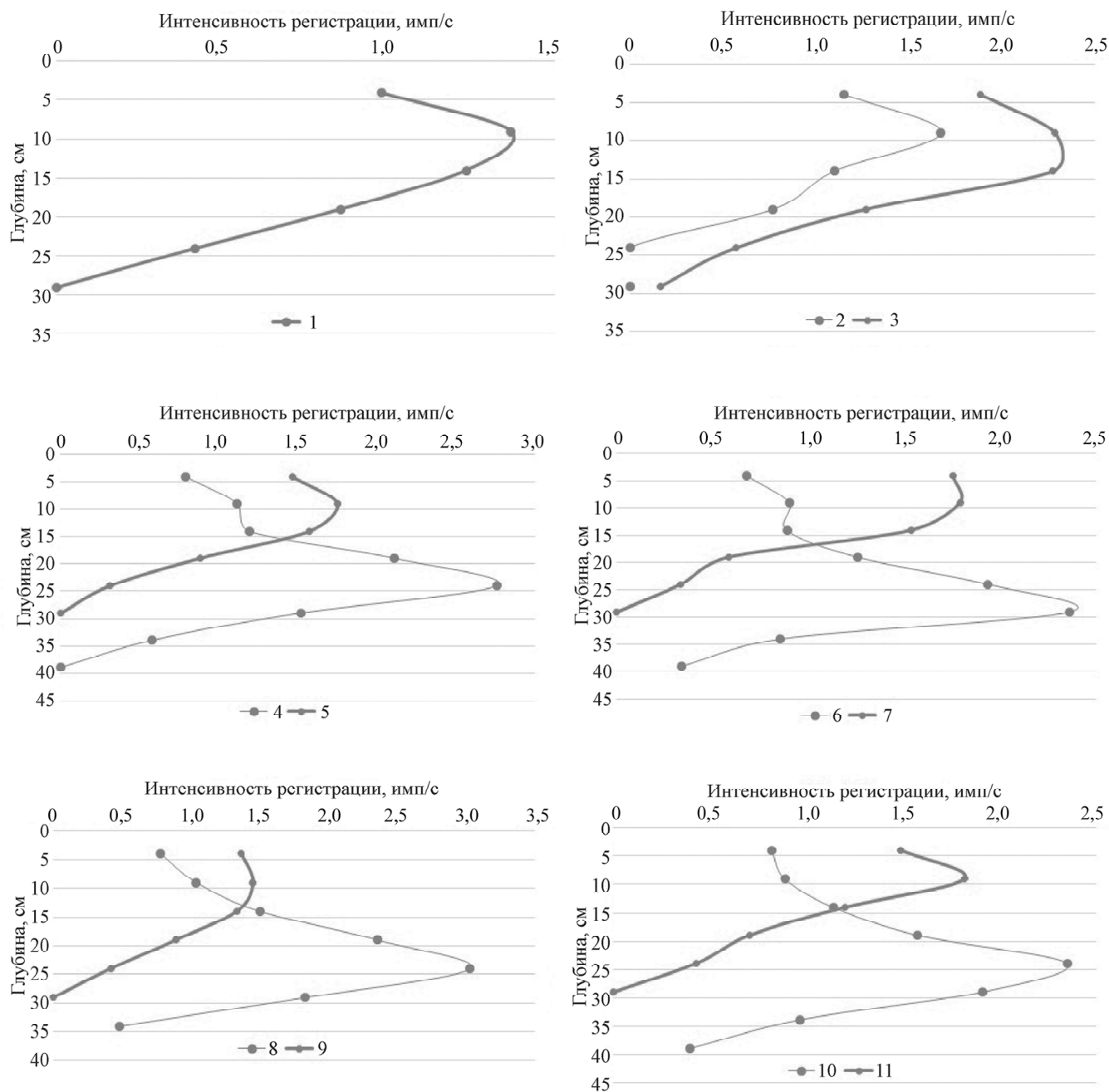


Рис. 3. Распределение интенсивности регистрации гамма-квантов энергии 661 КэВ ^{137}Cs по глубине на низком и среднем уровнях поймы р. Локны: 1 – разрез 1 (средняя); 2 – разрез 2 (низкая); 3 – разрез 3 (средняя); 4 – разрез 4 (низкая); 5 – разрез 5 (средняя); 6 – разрез 6 (низкая); 7 – разрез 7 (средняя); 8 – разрез 8 (низкая); 9 – разрез 11 (средняя); 10 – разрез 8 (низкая); 11 – разрез 9 (средняя)

Fig. 3. In-depth distribution of the intensity of registration of gamma-quanta energy 661 keV ^{137}Cs at low and middle floodplain levels of the Lokna River: 1 – cross-section 1 (middle); 2 – cross-section 2 (low); 3 – cross-section 3 (middle); 4 – cross-section 4 (low); 5 – cross-section 5 (middle); 6 – cross-section 6 (low); 7 – cross-section 7 (middle); 8 – cross-section 8 (low); 9 – cross-section 11 (middle); 10 – cross-section 8 (low); 11 – cross-section 9 (middle)

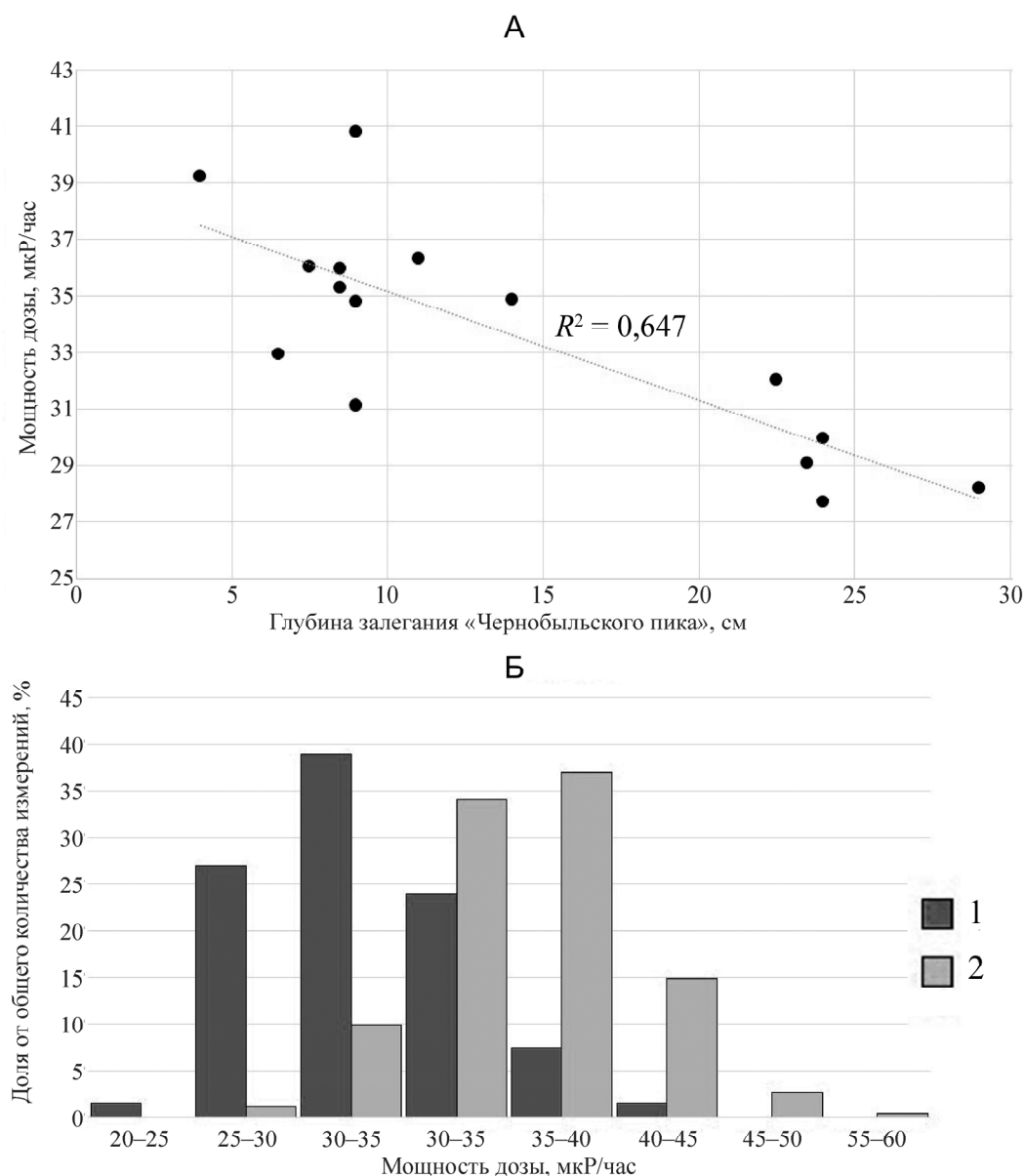


Рис. 4. Зависимость между интенсивностью пойменной аккумуляции и мощностью дозы в точках проведения полевой гамма-спектрометрии (А) и результаты площадной дозиметрической съемки (Б): 1 – низкая пойма, 2 – средняя пойма

Fig. 4. Correlation between the intensity of floodplain accumulation and the dose rate in the sites of field gamma-spectrometry (А) and the results of the terrain dosimetric survey (Б): 1 – low floodplain, 2 – middle floodplain

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ажигиров А.А., Голосов В.Н., Литвин Л.Ф. Эрозия на сельскохозяйственных землях и проблема защиты малых рек от заиления // Малые реки центра Русской равнины. М: МФГО, 1988. С. 51–61.

Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь) / Под ред. Израэля Ю.А., Богдевича И.М. Москва–Минск: фонд «Инфосфера» – НИА Природа, 2009.

Дедков А.П., Можжерин В.И. Эрозия и сток наносов на Земле. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 1984. 264 с.

Иванов М.М. Эрозионно-аккумулятивные процессы как фактор трансформации поля радиоактивного загрязнения бассейна р. Плавы: дис. ... канд. геогр. наук, М.: МГУ, 2017. С. 118–121.

Иванова Н.Н., Шамигурина Е.Н., Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Парамонова Т.А., Эвар О. Оценка перераспределения ^{137}Cs экзогенными процессами в днище долины р. Плав (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Вестн. Моск. ун-та, Сер. 5. Геогр. 2014. № 1. С. 24–34.

Мамихин С.В., Голосов В.Н., Парамонова Т.А., Шамигурина Е.Н., Иванов М.М. Вертикальное распределение ^{137}Cs в аллювиальных почвах поймы р. Локна в отдаленный период после аварии на ЧАЭС и его моделирование // Почвоведение. 2016. № 12. С. 1521–1533.

Пацукевич З.В., Кирюхина З.П., Козловская М.Э. Эрозия на пашне как источник загрязнения водоемов (количественные оценки) // Экологические проблемы эрозии почв и русловых процессов. М.: Изд-во МГУ, 1992. С. 16–28.

Beck H.J., DeCampo J.A., Gogolak C.V. In situ Ge(Li) and NaI(Tl) γ -ray spectrometry. HASL Report No. HASL-258, 1972.

Bird G. Provenancing anthropogenic Pb within the fluvial environment: Developments and challenges in the use of Pb isotopes. *Environment International*, 2011, vol. 37, p. 802–819.

Chesnokov A.V., Govorun A.P., Ivanov O.P., Liksonov V.I., Smirnov S.V., Potapov V.N., Fedin V.I., Shcherbak S.B., Urutskoev L.I. Technique for in situ measurement of Cs-137 deposit in soil under clean protected layer. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, vol. 44, no. 3, p. 769–773.

Chesnokov A.V., Govorun A.P., Linnik V.G., Shcherbak S.B. ^{137}Cs contamination of the Tcha river floodplain near the village of Muslumovo. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2000, vol. 50, p. 179–191.

Fridman S.D., Kvasnikova E.N., Glushko O.V., Golosov V.N., Ivanova N.N. Cesium-137 migration in conjugate geocomplexes of the Central Russian upland. *Russian Meteorology and Hydrology*, 1997, vol. 5, p. 26–34.

Golosov V.N., Ivanova N.N. Sediment associated Chernobyl ^{137}Cs redistribution in the small basins of Central Russia. *Applied Geomorphology: Theory and Practice* Allison R.J. (Ed.) Wiley & Sons, 2002, p. 165–181.

Golosov V.N., Walling D.E., Panin A.V. Post-fallout redistribution of Chernobyl-derived Cs-137 in small catchments within the Lokna river basin. *The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer*, IAHS Publ., 2000, vol. 263, p. 49–58.

Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Zapata F. (Ed.).

Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002, vol. 219, p. 9348054-9.

He Q., Walling D.E. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 1997, vol. 48, p. 677–690.

Konoplev A., Golosov V., Wakiyama Y., Takase T., Yoschenko V., Yoshihara T., Parenjuk O., Cresswell A., Ivanov M., Carradine M., Nanba K., Onda Y. Natural attenuation of Fukushima-derived radiocesium in soils due to its vertical and lateral migration. *Journal of environmental radioactivity*, 2018, vol. 186, p. 23–33.

Linnik V.G., Brown J.E., Dowdall M., Potapov V.N., Nosov A.V., Surkov V.V., Sokolov A.V., Wright S.M., Borghuis S. Patterns and inventories of radioactive contamination of island sites of the Yenisey River, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, vol. 87(2), p. 188–208.

Potapov V.N., Ivanov O.P., Chirkin V.M., Ignatov S.M. A dip detector for in situ measuring of Cs-137 specific soil activity profiles. *IEEE Transactions on nuclear science*, 2001, vol. 48(4), p. 1194–1197.

Vetrov V.A., Alexeev V.A., Poslov A.L., Cheremisinov A.A., Nikitin A.A., Bovkun L.A. Radionuclide washout from natural catchments in the Dnieper river basin. *J. Hydrol. & Meteorol.*, 1990, vol. 2, p. 120–123.

Walling D.E., Collins A.L. The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental science & policy*, 2008, vol. 11, iss. 2, p. 136–143. DOI: 10.1016/j.envsci.2007.10.004.

Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis S., Meharg A.A., Wright J. Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems. *Applied Geochemistry*, 2003, vol. 18, p. 195–220.

Поступила в редакцию 22.03.2020

После доработки 16.05.2020

Принята к публикации 25.08.2020

M.M. Ivanov¹, O.L. Komissarova²,
T.S. Koshovskiy³, A.S. Tsyplenkov⁴

APPLICATION OF FIELD GAMMA-RAY SPECTROMETRY AND DOSIMETRY TO STUDY SEDIMENTATION ON THE FLOODPLAIN OF A SMALL PLAIN RIVER IN THE ZONE OF RADIOACTIVE CONTAMINATION

The paper describes the experience of using portable gamma-ray spectrometric and dosimetric equipment for a large-scale geomorphological study of the Lokna river floodplain section subjected to intense radioactive contamination after the 1986 Chernobyl accident. The obtained results made it possible to produce in a short time and with low labor efforts a detailed picture of floodplain accumulation process in the studied area during the post-Chernobyl period. The measurement results were verified by layer-by-layer sampling of floodplain sediments and determining their radionuclide content under laboratory conditions. The highest rates of sedimentation were recorded in the low floodplain. Reduction of radionuclide concentrations in sediment runoff results in the burial of the most polluted layers under cleaner ones. Thus, the natural self-purification occurs, which leads to a systematic decrease in the dose rate of gamma radiation. This important from the radioecological point of view positive effect should be taken into account while forecasting the future situation.

Key words: Cs-137, radiocesium method, fluvial geomorphology, Chernobyl contamination

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. мол_а 18-35-00654).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: ivanovm@bk.ru

² Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Department of Radioecology and Ecotoxicology, post-graduate student; e-mail: komissarova-olga93@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: tkzv@ya.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Junior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: atsyplenkov@gmail.com

REFERENCES

- Atlas sovremennykh i prognoznnykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoj AES na postradavshih territoriyah Rossii i Belarusi (ASPA Rossiya-Belarus')* [Atlas of current and forecast aspects of the consequences of the Chernobyl accident within the affected territories of Russia and Belarus], Izrael'. Yu. A., Bogdevich I.M. (Eds.) Moscow–Minsk, Fond «Infosfera»–NIA Priroda Publ., 2009. (In Russian)
- Azhigirov A.A., Golosov V.N., Litvin L.F. [Erosion on agricultural lands and the problem of small river protection from aggradation]. *Malye reki centra Russkoj ravniny* [Small rivers of the central Russian Plain]. Moscow, MFGO Publ., 1988, p. 51–61. (In Russian)
- Beck H.J., DeCampo J.A., Gogolak C.V. *In situ* Ge(Li) and NaI(Tl) γ -ray spectrometry. HASL Report no. HASL, 258, 1972.
- Bird G. Provenancing anthropogenic Pb within the fluvial environment: Developments and challenges in the use of Pb isotopes. *Environment International*, 2011, vol. 37, p. 802–819.
- Chesnokov A.V., Govorun A.P., Ivanov O.P., Liksonov V.I., Smirnov S.V., Potapov V.N., Fedin V.I., Shcherbak S.B., Urutskoev L.I. Technique for in situ measurement of ^{137}Cs deposit in soil under clean protected layer. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, vol. 44, no. 3, p. 769–773.
- Chesnokov A.V., Govorun A.P., Linnik V.G., Shcherbak S.B. ^{137}Cs contamination of the Tcha river floodplain near the village of Muslumovo. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2000, vol. 50, p. 179–191.
- Dedkov A.P., Mozzherin V.I. *Eroziya i stok nanosov na Zemle* [Erosion and sediment runoff on the Earth], Kazan, Kazan Univ. Publ., 1984. 264 p. (In Russian)
- Fridman S.D., Kvasnikova E.N., Glushko O.V., Golosov V.N., Ivanova N.N. Cesium-137 migration in conjugate geocomplexes of the Central Russian upland. *Russian Meteorology and Hydrology*, 1997, vol. 5, p. 26–34.
- Golosov V.N., Ivanova N.N. Sediment associated Chernobyl ^{137}Cs redistribution in the small basins of Central Russia. *Applied Geomorphology: Theory and Practice*, Allison R. J. (Ed.), Wiley & Sons, 2002. p. 165–181.
- Golosov V.N., Walling D.E., Panin A.V. Post-fallout redistribution of Chernobyl-derived Cs-137 in small catchments within the Lokna river basin. *The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer*, IAHS Publ., 2000, vol. 263, p. 49–58.
- Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides*, Zapata F. (Ed.), Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2002, vol. 219, p. 9348054-9.
- He Q., Walling D.E. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils. *Applied Radiation and Isotopes*, 1997, vol. 48, p. 677–690.
- Ivanov M.M. *Erozionno-akkumulyativnye processy kak faktor transformacii poly radioaktivnogo zagryazneniya bassejna r. Plavy*. [Erosion and accumulation processes as a factor of transformation of radioactive contamination in the Plava River basin] Moscow, PhD Thesis in Geography, 2017, p. 118–121. (In Russian)
- Ivanova N.N., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., Paramonova T.A., Evar O. Ocenka pereraspredeleniya ^{137}Cs ekzogennymi processami v dnische doliny r. Plava (Tul'skaya oblast') posle avarii na Chernobyl'skoj AES [Assessment of ^{137}Cs redistribution by exogenic processes in the Plava River valley bottom (Tula oblast) after the Chernobyl accident], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2014, 1, p. 24–34. (In Russian)
- Konoplev A., Golosov V., Wakiyama Y., Takase T., Yoschenko V., Yoshihara T., Parenjuk O., Cresswell A., Ivanov M., Carradine M., Nanba K., Onda Y. Natural attenuation of Fukushima-derived radiocesium in soils due to its vertical and lateral migration. *Journal of environmental radioactivity*, 2018, vol. 186, p. 23–33.
- Linnik V.G., Brown J.E., Dowdall M., Potapov V.N., Nosov A.V., Surkov V.V., Sokolov A.V., Wright S.M., Borghuis S. Patterns and inventories of radioactive contamination of island sites of the Yenisey River, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, vol. 87(2), p. 188–208.
- Mamihin S.V., Golosov V.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N., Ivanov M.M. Vertical distribution of ^{137}Cs in alluvial soils of the Lokna River floodplain (Tula oblast) long after the Chernobyl accident and its simulation. *Eurasian Soil Sc.*, 2016, vol. 12, p. 1432–1442.
- Pacukevich Z.V., Kiryuhina Z.P., Kozlovskaya M.E. [Erosion on arable lands as a source of water bodies contamination (quantitative assessments)], *Ekologicheskie problemy erozii pochv i ruslovykh processov* [Environmental issues of soil erosion and channel processes], Moscow, MSU Publ., 1992, p. 16–28. (In Russian)
- Potapov V.N., Ivanov O.P., Chirkin V.M., Ignatov S.M. A dip detector for in situ measuring of ^{137}Cs specific soil activity profiles. *IEEE Transactions on nuclear science*, 2001, vol. 48(4), p. 1194–1197.
- Vetrov V.A., Alexeenko V.A., Poslovina A.L., Cheremisinov A.A., Nikitin A.A., Bovkun L.A. Radionuclide washout from natural catchments in the Dnieper river basin. *Journal of Hydrology & Meteorology*, 1990, vol. 2, p. 120–123.
- Walling D.E., Collins A.L. The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental science & policy*, 2008, vol. 11, iss. 2, p. 136–143. DOI: 10.1016/j.envsci.2007.10.004.
- Walling D.E., Owens P.N., Carter J., Leeks G.J.L., Lewis S., Meharg A.A. J. Wright Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems. *Applied Geochemistry*, 2003, vol. 18, p. 195–220.

Received 22.03.2020

Revised 16.05.2020

Accepted 25.08.2020