

Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2023. № 4 (81). С. 150–162.
The Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin. 2023; 4 (81):150–162.

Научная статья

УДК 624.131.43(282.247.412)

DOI 10.37724/RSU.2023.81.4.015

Новые данные о водно-физических свойствах почвогрунтов, слагающих эрозионные берега реки Оки¹

Алексей Юрьевич Воробьев¹, Александр Сергеевич Кадыров², Анна Александровна Балобина³

^{1,2,3} Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина, Рязань, Россия

¹ a.vorobyov90@mail.ru

² aliexandr.kadyrov.93@mail.ru

³ balobina-anna@rambler.ru

Аннотация. Исследовались водно-физические свойства почвогрунтов в пойме реки Оки. Лабораторные испытания проб отложений осуществлялись в аккредитованной лаборатории САС «Рязанская». Цель работы — описание вещественного состава и степени увлажнения почвогрунтов, вскрытых в эрозионных уступах высокой поймы на вогнутых берегах излучин реки Оки. Фактическая основа для описания — результаты определения влажности почвогрунтов и их гранулометрического состава по методу пипетки (80 проб). В процессе исследования проводилось структурирование и классификация полученных данных и соотнесение проб грунта со стратиграфо-генетическими слоями отложений на полустационарах. Осуществлялось формирование графических приложений в программе STATISTICA 10.0, данные распределялись на характерные группы по механическому составу и степени увлажнения. Классификация грунтов проводилась в том числе с помощью универсального подхода, принятого в отечественной и зарубежной геологии, — треугольников Ферре. Впервые были установлены характерные значения содержания песчаных, пылеватых и илистой фракций в отложениях древней окской поймы, в том числе в пределах ее участков, вовлеченных в интенсивное хозяйственное использование. Полученные данные могут быть интегрированы в оценки устойчивости русла реки Оки, применены в прогнозах потерь хозяйственно ценных земельных угодий с выявлением зависимостей этих потерь от морфометрических параметров речных берегов.

Ключевые слова: эрозионно-аккумулятивные процессы, пойма реки Оки, полустационар геоморфологический, влажность грунтов, гранулометрический анализ.

Для цитирования: Воробьев А. Ю., Кадыров А. С., Балобина А. А. Новые данные о водно-физических свойствах почвогрунтов, слагающих эрозионные берега реки Оки // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. 2023. № 4 (81). С. 150–162. DOI: 10.37724/RSU.2023.81.4.015.

Original article

New data on the water-physical properties of soils along the eroded banks of the Oka River

Alexey Yu. Vorobyov¹, Aleksandr S. Kadyrov², Anna A. Balobina³

^{1,2,3} Ryazan State University named for S. A. Yesenin, Ryazan, Russia

¹ a.vorobyov90@mail.ru

² aliexandr.kadyrov.93@mail.ru

³ balobina-anna@rambler.ru

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-00050 «Геоморфологический и геодезический мониторинг рельефообразования на эрозионных берегах реки Оки».

Abstract. The article examines the water-physical properties of soils in the floodplain of the Oka River. Tests of sediment samples were conducted in the accredited laboratory of the *Ryazanskaya SAS* (Agrochemical Service Station). The objective of the work is to describe the material composition and the moisture levels of soils exposed in the erosion scarps of the high floodplain on the concave banks of the Oka River bends. The factual basis for describing these was the results of determining soil-ground moisture and its granulometric composition obtained by the pipette method (80 samples). During the research, we structured and classified the findings, and correlated soil samples with stratigraphic-genetic layers of sediments at our semi-permanent stations. We designed graphical representations using STATISTICA 10.0 application. The findings were divided into groups characterized by mechanical composition and moisture levels. The classification of soils was also conducted through a universal approach adopted in Russian and foreign geology — the Ferrer triangles. This is the first research that establishes the typical values of the content of sandy, silty and muddy fractions in sediments of the ancient Oka floodplain, including its areas involved in intensive exploitation. The findings can be integrated in the stability index of the Oka riverbed and applied in the forecasts of losses of valuable agricultural land, with identification of the dependency of such losses on the morphometric parameters of the river banks.

Keywords: erosion-accumulative processes, floodplain of the Oka River, geomorphic semi-permanent station, soil moisture, granulometric analysis.

For citation: Vorobyov A. Yu., Kadyrov A. S., Balobina A. A. New data on the water-physical properties of soils along the eroded banks of the Oka River. *The Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin*. 2023; 4 (81):150–162. (In Russ.). DOI: 10.37724/RSU.2023.81.4.015.

Введение

Среди задач научно-исследовательского проекта РНФ 22-77-00050 «Геоморфологический и геодезический мониторинг рельефообразования на эрозионных берегах реки Оки» значимое место занимает определение гранулометрического состава и влажности большого количества (>400) образцов почвогрунтов. В ходе реализации проекта предполагался отбор всех проб грунтов и почв в пределах четырех учетных площадок на подмываемых окских берегах. В настоящем отчете приводятся результаты гранулометрического анализа 80 проб отложений, изъятых с двух учетных площадок (полустационаров): «Заокское» и «Дядьково». Эти и прочие точки наблюдений за хозяйственно значимым геоморфологическим процессом в Рязанской области — эрозией берегов русла Оки — расположены на нижних крыльях излучин реки. Как известно (см.: [Эрозионно-руслевые системы, 2017 ; Facies Models ... , 1992 ; Charlton, 2008 ; Donovan, Miller, Baker, Gellis, 2015]), именно такие морфодинамические позиции наиболее предрасположены к резким, зачастую катастрофическим обрушениям откосов, особенно на спаде паводковой волны.

Необходимость мониторинга горизонтальных русловых деформаций неоднократно отмечалась в специальной литературе (см.: [Егоров, 2017 ; Эрозионно-руслевые системы, 2017 ; Couper, 2001]). Часто, в условиях средней полосы России, соответствующие наблюдения становятся одним из двух-трех доминирующих направлений геоморфологических исследований (см.: [Смирнова, Лобанов, Бахраков, 2009 ; Завадский, Лобанов, Петухова [и др.], 2010 ; Воробьев, Кадыров, 2020]). Необратимые потери ценных сельскохозяйственных угодий (пашни, сенокосы, пастбища), примыкающих к руслам крупных рек, привлекают внимание исследователей. Несмотря на то, что отступление берегов является естественным процессом русловой морфодинамики, полустационарные наблюдения призваны минимизировать эффект неожиданности от ежегодной мобилизации береговых отложений и служат основой для прогнозов дальнейшего продвижения эрозии вглубь поймы. Решение обеих задач невозможно без представлений о составе и водно-физических свойствах почв и грунтов на примыкающих к речному руслу участках поймы. Гранулометрический состав их осадков и степень увлажнения являются базовыми данными для более детальной характеристики местных геологических условий — статического фактора горизонтальных деформаций русла Оки.

Оба полустационара находятся в пределах Рязанского расширения днища окской долины, которое отличается сложной пространственной координацией множества геологических тел (рис. 1). Деление Рязанского расширения на морфологически автономные пойменные генерации ранее выполнено нами (см.: [Кривцов, Воробьев, 2014]), по результатам установлено, что большую часть расширения занимают участки наложенной поймы, на которых голоценовый пойменный аллювий подстилается моренными и водно-ледниковыми отложениями. Крутые пойменные уступы полустационара «Заокское», как и на учетной площадке «Дядьково», частично выполнены подобными сложными геологическими телами. Предполагается, что неординарность строения рельефа должна отражаться в скорости отступления береговых откосов на высоте различных геологических горизонтов. Проблема боковой эрозии речного русла приобретает

в данном контексте комплексный характер, имея под собой основу реологических и инженерно-геологических свойств отложений берегов. Эксперименты на водотоках средней полосы России показали перспективность углубления геоморфологических исследований за счет обращения к оценке механических и водно-физических свойств почвогрунтов на эрозионных берегах для прогноза их динамики (см.: [Смирнова, Лобанов, Бастраков, 2009]).

В настоящем исследовании использовались общепринятые методы визуализации результатов лабораторных испытаний влажности и гранулометрического состава почвогрунтов. Их интеграцию в аналитическую работу можно найти во многих работах по геологии, геоморфологии и русловедению (например: [Вадюнина, Корчагина, 1986; Далматов, 1988; Смирнова, Лобанов, Бастраков, 2009; Муромцев, Мажайский, Семенов [и др.], 2011; Taghavi, Dovoudi, Amiri-Tokaldany, Darby, 2010]). Зарубежный и отечественный опыт изучения вопросов динамики неровностей земной поверхности, в том числе форм пойменно-руслового рельефа, свидетельствует, что на первом этапе следует определить разновидность обломочных пород, а в дальнейшем — выявлять детерминируемые этим реологические и инженерно-геологические свойства геологических массивов. Механический состав обломков, от ила до песка и гравия, может быть установлен путем гранулометрического анализа (см.: [Вадюнина, Корчагина, 1986]), и в настоящей работе нами подготовлено описание данных, полученных пипеточным методом (Робинсона). Аналогичным образом обработана информация о распределении влажности в образцах отложений, отобранных с обоих полустационаров. Также проведена классификация проб почвогрунтов двумя способами (по содержанию ила, алеврита и песка и только по доле ила), уточнен состав анализируемых осадков и осложняющих их дневной и погребенных почв.

Основная часть

Материалы и методы

Каждая из 80 проб почв и грунтов, введенная в аналитическую работу, одновременно анализировалась на процентное содержание влаги (параметр W) и гранулометрический состав пипеточным методом. Все анализы выполнены в аккредитованной лаборатории САС «Рязанская». Общее количество проб достигает 80, из них 51 образец отобран из берега на учетной площадке «Заокское», а 29 образцов — на площадке «Дядьково» (рис. 1). Средняя высота берегов на полустационарах достигает 6,2 м в меженный период. Пробы почвогрунтов, описание свойств которых приводится в настоящем исследовании, неравномерно распределены по высотным уровням береговых откосов. Еще в большей мере анализ усложняется из-за реликтов позднечетвертичной эволюции поймы на учетных площадках, что предполагает учет стратиграфогенетического положения каждой отобранной пробы.



Рис. 1. Распределение влажности на стационарах «Дядьково» и «Заокское»

Визуализация результатов анализа выполнена в форме диаграмм «ящики и усы» (типичное представление данных в ANOVA-анализе), кривых распределения случайной величины и гистограмм. Проверка статистических гипотез выполнена по критериям Колмогорова — Смирнова, Лиллиефорса, Шапиро — Уилка, оперирование ими приемлемо реализуется в пакете STATISTICA. Использовалась корреляция Спирмена для оценки связи водно-физических и морфометрических параметров почвогрунтов, не имеющих распределение Гаусса. Гранулометрический состав пород изображен на треугольнике Ферре, что позволяет отнести пробу грунта к одному из 12 классов (см.: [Далматов, 1988 ; Теории и методы физики почв, 2007]). Положение полустационаров относительно современного русла реки Оки и прочих объектов показано на карте, составленной в QGIS v.3.18.

Полученные результаты и их обсуждение

Значения W (влажности грунтов) на обеих учетных площадках имеют вид гистограммы с четко выраженным «хвостом» в интервале значений $W=4-12\%$ (рис. 2).

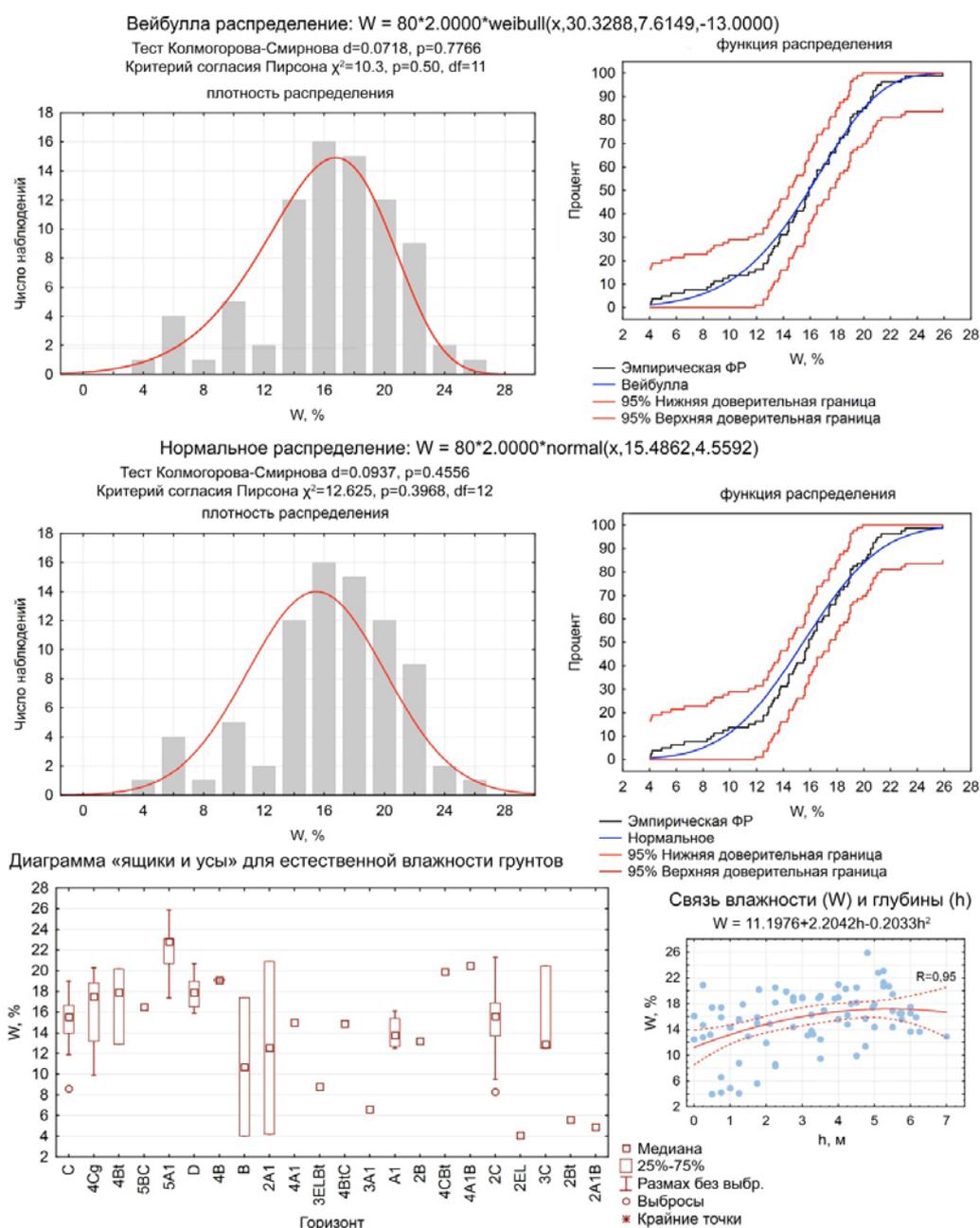


Рис. 2. Распределение влажности на полустационарах «Дядьково» и «Заокское»

Мода соответствует $W=16\%$. Левосторонняя асимметрия выборки зафиксирована в отклонении гипотезы о распределении эмпирических значений по нормальному закону. По результатам одновыборочного критерия Колмогорова — Смирнова можно было бы утверждать обратное, однако тесты Лилиефорса ($p < 0,10$) и Шапиро — Уилка ($p = 0,0055$) на нормальность не пройдены. Поэтому нормальная колоколообразная кривая с математическим ожиданием $\mu = 15,4862$ и $\sigma^2 = 4,5592$ посредственно приближает данные. Подгонка распределений в STATISTICA 10.0 (см.: [Вуколов, 2008]) показала хорошую согласованность с трехпараметрическим распределением Вейбулла. Одновыборочный тест Колмогорова — Смирнова и тест согласия Пирсона успешно пройдены для этой функции, плотность которой может быть записана следующим образом (1):

$$f_W(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x-\theta}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x-\theta}{\lambda}\right)^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где коэффициент формы $k=30,3288$, коэффициент масштаба $\lambda=7,6149$, коэффициент сдвига $\theta=-13$.

На вероятностных графиках функций распределения заметно, что, хотя фактические значения попадают в $R=0,95$ в обоих случаях, распределение Вейбулла точнее описывает выборку, особенно в интервале $W > 14\%$.

Наиболее часто повторяющаяся величина ряда $W=16\%$ соответствует пороговому значению влажности разрыва капилляров для средних суглинков (см.: [Теории и методы физики почв, 2007]). Активное перемещение доступной для растений влаги в верхних слоях берегов было невозможным в конце 2022 гидрологического года, либо толщи грунта успели потерять значительное количество свободной воды до отбора проб. Как будет показано далее, в нижних горизонтах геологических тел участков мониторинга преобладают тяжелые суглинки и глины, для которых весовая влажность грунта менее 20% заведомо недостаточна для активного вертикального движения воды в поровом пространстве. Обычно в конце гидрологического года значения W в почвенно-растительном слое (ПРС) и подпочве в пойме Оки составляют порядка 20–30% (см.: [Муромцев, Мажайский, Семенов [и др.], 2011]). На участках центральной поймы, удаленных от реки, с глубиной она снижается (см.: [Селиванов, Сидоров, Алексеев, 1974]), но в нашем случае влажность геологического наполнения русловых откосов, наоборот, возрастает в направлении уреза. Аппроксимация значений W , распределенных по глубине, полиномом второй степени подтверждает отмеченную тенденцию. Только в слое отложений 0,0–2,0 м от поверхности поймы выделяются пробы с $W < 8\%$, что соответствует гигроскопической влажности местных почвогрунтов в летнее время (см.: [Муромцев, Мажайский, Семенов [и др.], 2011]).

Несомненно, верхняя часть геологических тел полустационаров значительно быстрее теряет влагу от атмосферных осадков, которые (в том числе в жидкой форме) были весьма обильными осенью 2022 года. Этим объясняется «сухость» ПРС и кровли материнской породы дневной почвы. Как и на большинстве прочих учетных площадок, на полустационарах «Дядьково» и «Заокское» под дневной почвой залегают педолитокомплексы из нескольких голоценовых почв. В них нами выделены следующие стратиграфо-генетические горизонты:

- 1) гумусово-аккумулятивный горизонт дневной почвы (A1);
- 2) нижняя часть гумусово-аккумулятивного горизонта дневной почвы (A1B);
- 3) переходный горизонт дневной почвы (B);
- 4) материнская порода для дневной почвы — старичная фация голоценового аллювия (C);
- 5) гумусово-аккумулятивный горизонт первой от поверхности погребенной почвы ([2A1]);
- 6) нижняя часть гумусово-аккумулятивного горизонта первой от поверхности погребенной почвы ([2A1B]);
- 7) осветленный элювиальный горизонт первой от поверхности погребенной почвы ([2EL]);
- 8) переходный горизонт первой от поверхности погребенной почвы ([2B]);
- 9) гумусово-аккумулятивный горизонт второй от поверхности погребенной почвы ([3A1]);
- 10) элювиально-иллювиальный горизонт второй от поверхности серой лесной почвы ([3ELBt]);
- 11) материнская порода для второй от поверхности погребенной почвы — пойменная фация голоценового аллювия ([3C]);

- 12) гумусово-аккумулятивный горизонт третьей от поверхности серой лесной погребенной почвы ([4A1]);
- 13) нижняя часть гумусово-аккумулятивного горизонта третьей от поверхности погребенной почвы ([4A1B]);
- 14) переходный горизонт третьей от поверхности погребенной почвы ([4B]);
- 15) текстурно-иллювиальный горизонт третьей от поверхности погребенной почвы ([4Bt]);
- 16) переходный горизонт от иллювиального к материнской породе третьей от поверхности погребенной почвы с преобладанием признаков иллювиального горизонта ([4BtC]);
- 17) переходный горизонт от иллювиального к материнской породе третьей от поверхности погребенной почвы с преобладанием признаков материнской породы ([4CBt]);
- 18) глееватая материнская порода для третьей от поверхности погребенной почвы — пойменная фация аллювия ([4Cg]);
- 19) гумусово-аккумулятивный горизонт четвертой от поверхности погребенной почвы, как правило, лугово-черноземной ([5A1]);
- 20) переходный горизонт к материнской породе четвертой от поверхности погребенной почвы ([5BC]);
- 21) порода, подстилающая материнскую, не затронута почвообразованием — русловая фация аллювия (D).

Только половина (11) из перечисленных горизонтов представлена более чем одной пробой отложений: A1, B, C, [2A1], [2C], [3C], [4B], [4Bt], [4Cg], [5A1], D. Показательна низкая влажность верхних горизонтов педолитокомплекса [2A1] и B. Напротив, запасы влаги у основания откосов (горизонты [4CBt], [4Cg], [5A1], D) повышены, даже невзирая на возможную потерю части влаги при хранении проб. Очевидно, что игнорирование при подборе теоретической функции W осадков из погребенных серых лесных и аллювиальных почв приблизило бы распределение выборки к нормальному закону. «Хвост» эмпирического распределения на 75 % представлен пробами из отложений, залегающих в интервале высот 0–2,25 м от дневной поверхности. Наличие низких значений W и асимметрия общей выборки, таким образом, имеют физическую основу: наименее влажными оказываются хорошо структурированный и трещиноватый ПРС наряду с молодыми палеопочвами (см.: [Егоров, 2017 ; Taghavi, Dovoudi, Amiri-Tokaldany, Darby, 2010 ; Donovan, Miller, Baker, Gellis, 2015]).

Деление геологического наполнения полустационаров обуславливает также различия в механическом составе, пространственно распределенные по русловым откосам (рис. 3).

Значительная доля ила в горизонте B дневной почвы позволяет предположить активное участие лессиважа в современном почвообразовании. Однако по двум пробам сложно судить, насколько пространственно устойчиво обогащение минеральной массы тонкодисперсным материалом. То же самое можно утверждать про иллювиальный горизонт третьей от поверхности погребенной почвы. В целом, породы, в которых формировались вторая и третья погребенные почвы (серые лесные), богаты илом. Медианы выборок соответствующих слоев находятся в интервале значений 30–35 %. Примечательно, что наиболее древняя лугово-черноземная почва сформировалась в илистых суглинках с низким содержанием ила, подобный состав обнаруживается и у гумусово-аккумулятивного горизонта самой молодой погребенной почвы. Эволюция палеопочв различных типов происходит в сложном взаимодействии аккумуляции аллювия и внутрпочвенных процессов, что осложняет интерпретацию генезиса отложений (см.: [Александровский, Гласко, 2014]).

Значительная часть геологического наполнения обоих полустационаров представлена горизонтом C, который довольно однороден по гранулометрическому составу: квартильный размах доли ила равен 10–25 %, почти все пробы определяются как илистые суглинки. На треугольнике Ферре наиболее легким гранулометрическим составом отличаются горизонт D, который на площадке «Заокское» представлен горизонтально слоистой толщей песков и супесей. Возможно, что эти осадки на окраине останца первой надпойменной террасы имеют гляцио-флювиальный генезис и формировались при мощных весенних половодьях в течение терминального плейстоцена (см.: [Панин, Сидорчук, 2006]). Подобный вероятный механизм осадко-накопления в границах первой надпойменной террасы днища долины средней Оки был изложен еще А. А. Асеевым [Асеев, 1959]. На полустационаре «Дядьково» горизонт D — моренные отложения, имеющие состав от глин до глино-илистых суглинков. Самые распространенные по

количеству проб горизонты 2С и С, видимо, представляют собой локальные микрофации (микроциклотоны) (см.: [Miall, 2014]). Вне зависимости от расположения, большинство проб из них представлено илстыми суглинками. Распространены также песчано-глинистые суглинки и суглинистые пески. Аккумуляция таких осадков на средней и высокой пойме происходит в особенно мощные половодья при резком усилении взаимодействия руслового и пойменного потоков (см.: [Лазаренко, 1964 ; Эрозионно-русловые системы, 2017]).

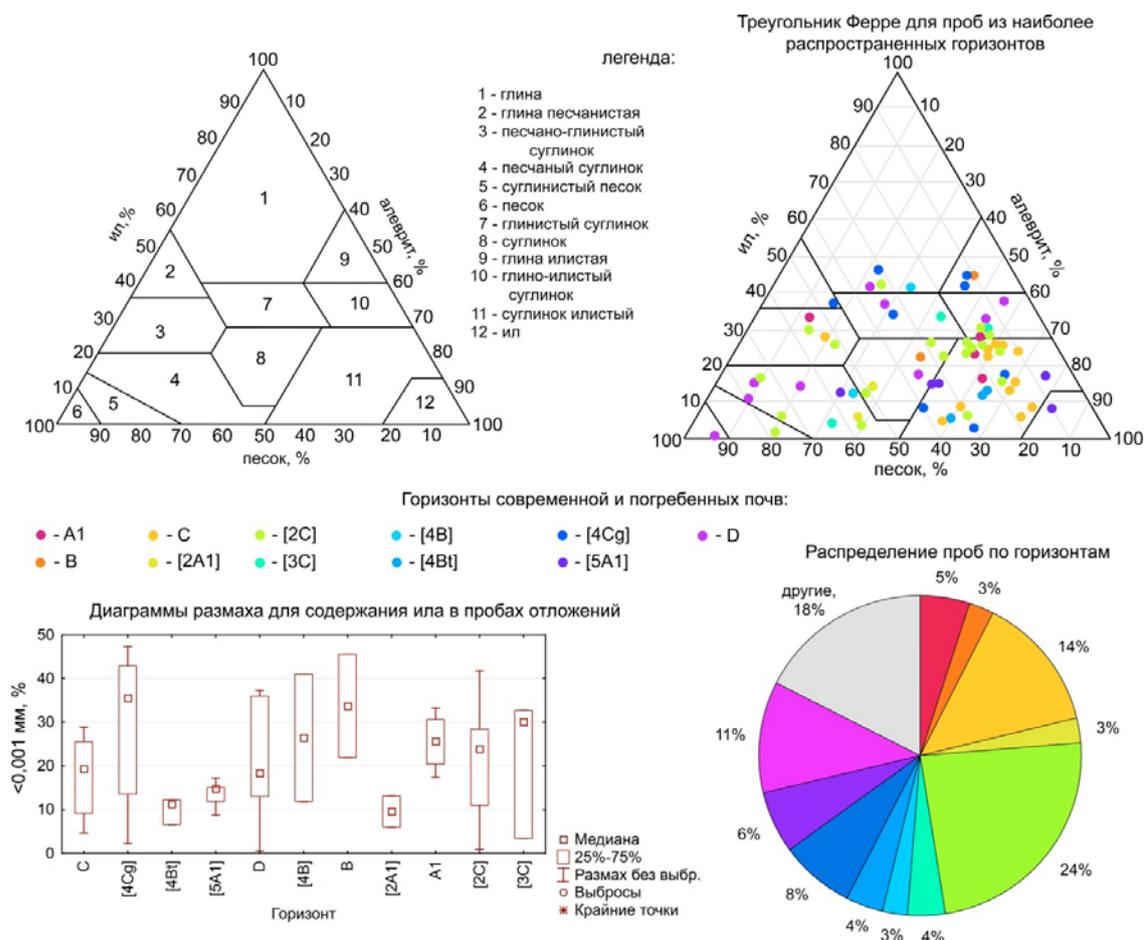


Рис. 3. Гранулометрический состав проб почвогрунтов на полустационарах «Дядьково» и «Костино»

Подготовленный нами обзор гранулометрического состава проб отложений на основе классификации по содержанию ила, использующейся в инженерной геологии (см.: [Далматов, 1988]), позволяет заключить, что 5 % проб представлены песками, 21 % — глинами, 74 % — суглинками. Более сложная классификация, визуализированная на треугольнике Ферре, свидетельствует о частой встречаемости илстых суглинков (40 % образцов грунта) в исследуемых геологических телах. Помимо наличия сложноорганизованных педолитокомплексов, древность окской поймы в обоих случаях подтверждается недостаточным участием частиц >0,05 мм в ее составе. Диагностировано всего 12 проб песков, суглинистых песков и опесчаненных суглинков. Рельеф учетных площадок следует признать состоящим из пылевато-глинистых пород, обычных, по общепризнанным фациальным моделям (см.: [Лазаренко, 1964 ; Facies Models ... , 1992 ; Charlton, 2008 ; Miall, 2014]), в сложении древних массивов центральной поймы на реках, подобных Оке.

Для оценки скорости горизонтальных деформаций речных русел одним из важнейших параметров считается D_{50} — средний диаметр русловых отложений (см.: [Завадский, Лобанов, Петухова [и др.], 2010 ; Эрозионно-русловые системы, 2017 ; Couper, 2001 ; Bouhmadouche, Hemdane, 2016]). Он примерно соответствует размеру частиц, наиболее устойчивому на дне потока. Частицы

меньше этого диаметра уносятся течением и входят в состав взвешенных наносов, хотя и могут депонироваться в зонах с замедленным течением. В отличие от дна реки Оки, механический состав наносов которого во многом контролируется скоростным режимом потока и его морфодинамикой, стратиграфия береговых откосов наследуется от четвертичной эволюции поймы. Их мобилизация берегов потоком может быть более активной (см.: [Егоров, 2017; Taghavi, Dovoudi, Amiri-Tokaldany, Darby, 2010; Bouhmadouche, Hemdane, 2016]) при примеси песка, гравия и валунов в пылевато-глинистых осадках. Ухудшение прочностных свойств учитывается коэффициентом неоднородности грунта C_V , который рассчитывается по формуле (2) (см.: [Вуколов, 2008]):

$$C_V = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad (2)$$

где D_{60} — диаметр частиц грунта, крупнее которого 40 % частиц в пробе, D_{10} — диаметр частиц грунта, крупнее которого 90 % частиц в пробе.

Изменение параметров D_{50} и C_V по высоте берегов можно видеть на диаграммах рассеяния (рис. 4):

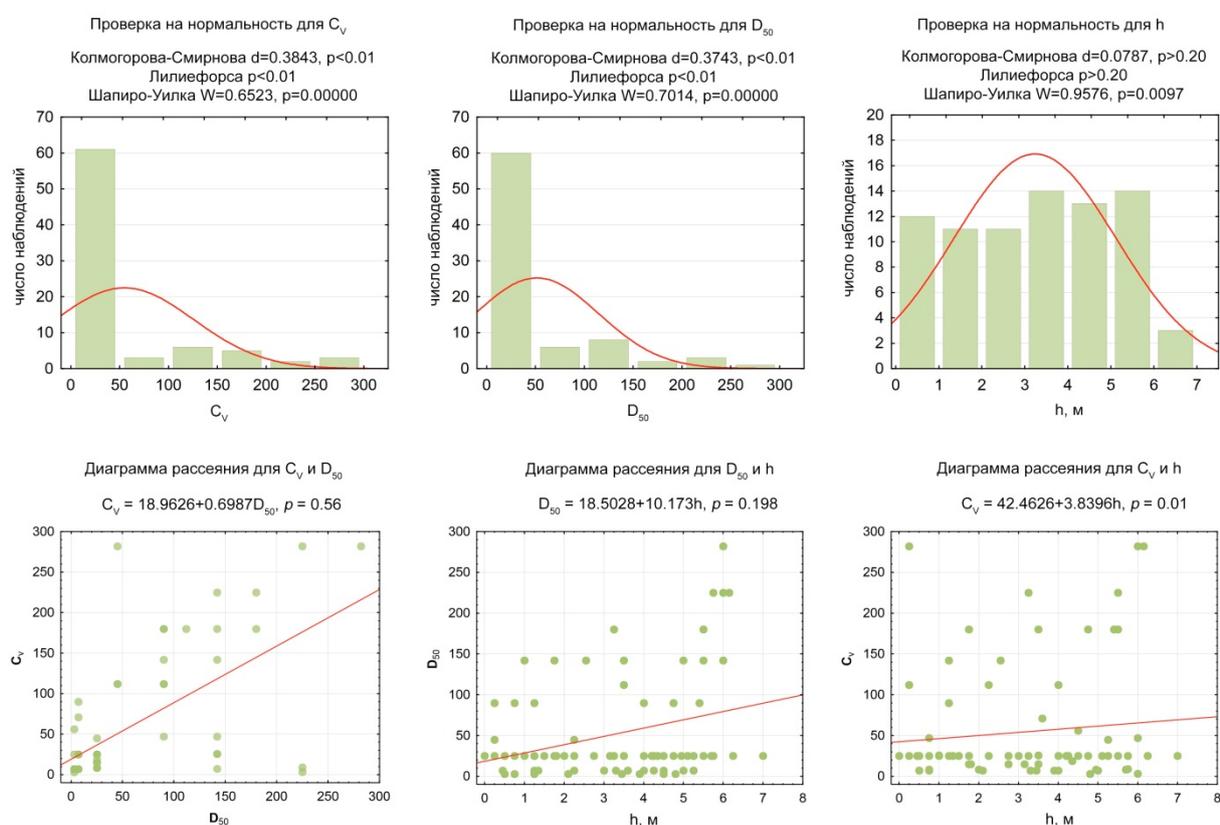


Рис. 4. Проверка на нормальность выборок значений высоты берегов, D_{50} и C_V отложений, корреляция параметров по Спирмену (все корреляции значимы при $p<0,05$)

Все процентилю обеспеченности размером частиц в пробах почвогрунтов определены нами по кумулятивным кривым гранулометрического состава. Среди трех факторов (глубина от поверхности поймы h и геологические параметры) по тестам Колмогорова — Смирнова и Лиллиефорса нормально распределен только h . По более мощному критерию Шапиро — Уилка ни один из параметров не распределен нормально. До 75 % проб почвогрунтов приходится на относительно однородные ($C_V<50$) тонкодисперсные ($D_{50}<50$ мкм) отложения, второй по частоте моде соответствует около 15 % случаев тождественности отмеченных параметров фракции мелкого песка (0,1–0,25 мм).

Коэффициент неоднородности грунта и D_{50} должны иметь прямую связь между собой, поскольку при добавлении песчаных и гравелистых частиц в пылевато-глинистую массу C_v увеличивается на порядки. Непараметрический тест Спирмена показал наличие достаточно сильной связи между этими переменными — статистика (p) достигает 0,56. Крайне слабая связь ($p=0,198$) обнаруживается между медианным диаметром частиц и глубиной от поверхности поймы, большинство значений D_{50} группируется в виде линии в интервале алеврита вне зависимости от гипсометрического положения на откосе. Исходная текстура пойменной фации аллювия в поймах рек обычно горизонтально слоистая, даже если впоследствии слоистость фрагментируется почвообразованием и деятельностью почвенной фауны (см.: [Лазаренко, 1964 ; Смирнова, Лобанов, Бастраков, 2009 ; Кривцов, Воробьев, 2014]). Условия залегания аллювиальных отложений и их пространственная ординация с нерусловыми доголоценовыми осадками различаются от места к месту, что не позволяет выделить какие-либо геометрические тенденции в крупности отложений горизонтов В и С. Имеющиеся данные о составе горизонтов погребенных почв также недостаточны для поиска подобных тенденций.

При оценке C_v не учитывалась щебнистость горизонтов [4A1], [4Bt], [5A1], [5BC] и D. В пачках пойменной фации аллювия, осложненной реликтами почвообразования и ледниковых осадков, выходящих на урез Оки, нам встречались валуны массой в первые сотни килограммов и диаметром по наибольшей оси 0,8–1,0 м. Верхняя граница C_v при расчете общей неоднородности всего спектра частиц в породе, от коллоидов до валунов, возрастет до миллиона. Следуя ГОСТ 25100-2020 [ГОСТ 25100-2020, 2020], можно признать все образцы почвогрунтов неоднородными по гранулометрическому составу с $C_v > 3$. Данный параметр совершенно не коррелирует с положением места изъятия пробы на откосах полустационаров, хотя, по аналогии с D_{50} , до 76 % проб имеют C_v в интервале от 3 до 50.

Для того чтобы определить, насколько отложения двух площадок мониторинга различаются между собой по основным параметрам гранулометрического состава, мы использовали двухвыборочный критерий Колмогорова — Смирнова и U-тест Манна — Уитни (рис. 5). Выборки считаются заимствованными из одной генеральной совокупности в том случае, если p-уровень значимости результатов тестирования $> 0,05$ (см.: [Вуколов, 2008]).

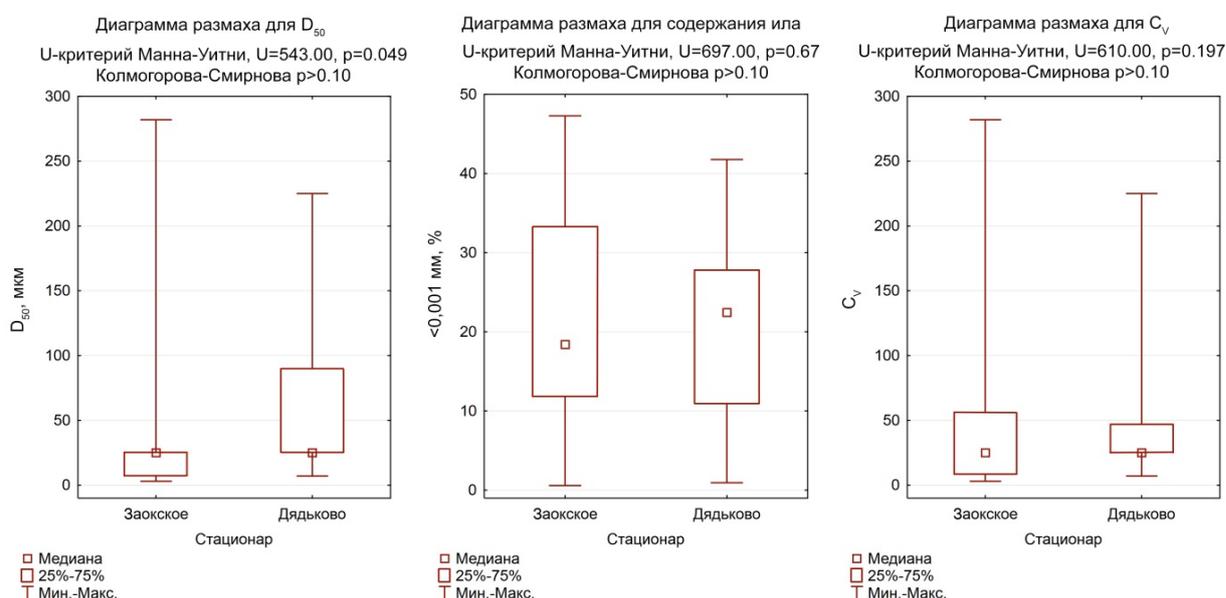


Рис. 5. Сравнение параметров гранулометрического состава для обоих полустационаров

Почти все ситуации сравнения выборок по конкретным критериям показали несущественность отличий между отложениями полустационаров. Лишь в отношении D_{50} две группы проб различаются по U-тесту, но p имеет пороговое значение 0,049, что также позволяет отменить гипотезу о наличии существенных различий между геологическим наполнением обеих учетных площадок. Наибольшей асимметрией отличаются выборки по коэффициенту неоднородности и среднему диа-

метру частиц, причем «усы» вытянуты в сторону больших значений. На полустационаре «Заокское» особенно велик разброс данных по обоим параметрам, обусловленный значительной неоднородностью минеральной массы гумусово-аккумулятивных горизонтов первой, третьей и четвертой от поверхности палеопочв. По нашему мнению, это объясняется зоотурбациями в активном слое почв в эпохи, предшествующие захоронению данных горизонтов под слоями пойменного наилка.

Проведенное сравнение свидетельствует о более глинистых отложениях на полустационаре «Дядьково». Медиана содержания ила находится в интервале тяжелых суглинков, в то время как в осадках на другой учетной площадке содержание частиц <0,001 мм, в среднем на 5 % меньше. Существенен вклад различного по генезису горизонта D, поскольку в первом случае он представлен моренными суглинками, а во втором — гляциофлювиальными песками и супесями. Вместе с тем повсеместно распространены глины: для горизонта [4Cg] было получено 3 пробы с содержанием ила >40 %. Тонкодисперсные осадки хорошо удерживают воду, их дренаж затруднен даже в непосредственной близости от Оки, поэтому отложения данного горизонта оглеены. Явные признаки восстановительных геохимических условий встречаются только в этом горизонте, предположительно, постоянный застой влаги может приводить к усилению рельефообразования в теплый сезон года за счет отседания отдельных микроблоков породы.

Заключение

Результаты лабораторных испытаний водно-физических свойств почвогрунтов позволяют заключить, что вся выборка проб (80 штук) на двух полустационарах получена из одной генеральной совокупности. Вывод основывается на сопоставлении группированных данных по основным параметрам вещественного состава: коэффициенту неоднородности грунта C_v , среднему диаметру части D_{50} и содержанию ила. Отложения надводных частей берегов русла Оки в целом довольно слабо отличаются от места к месту, неоднородности состава глубоких горизонтов сглаживаются единообразием пойменной фации аллювия, мощность которой на исследованных участках составляет до 2–4 м. Было диагностировано 3 песчаные пробы, 17 образцов относятся к глинам, три четверти образцов определены как суглинистые.

Часть исследованных осадков отличает высокая глинистость с содержанием ила почти до 50 %, причем такие пробы изъяты как из пойменной фации голоценового аллювия, так и из горизонтов палеопочв и нерусловых осадков ледникового генезиса в нижней части береговых уступов. Одновременное присутствие разнообразных по крупности частиц (от коллоидов до щебня и валунов), вероятно, провоцирует обрушения откосов, делая их рельеф нестабильным. Это ведет к сложно предсказуемой динамике потерь земель на участках древней поймы Оки, анализ эрозии подобных массивов должен, по нашему мнению, опираться не только на водно-физические свойства почвогрунтов, но и представления об изменчивости их реологических и механических параметров.

Установлено, что вертикальное распределение влаги по береговым откосам обеспечивает высокое насыщение грунтов в их нижней части и недостаток увлажнения верхней части. Подобранный коэффициент Вейбулла для влажности почвогрунтов свидетельствует об асимметрии выборки, которая обеспечивается наличием быстро теряющих влагу горизонтов В и С дневной почвы и горизонтов первой от поверхности погребенной почвы. Средние различия между увлажненной нижней частью берегов на высоте <1,5 м от зеркала грунтовых вод и почвогрунтами в интервале 0,0–2,0 м от поверхности поймы составляют 2–4 %. Неодинаковый режим увлажнения гипсометрических уровней берегов Оки на полустационарах, несомненно, должен оказывать влияние на интенсивность береговой морфолитодинамики, расчеты которой являются отдельным направлением региональных геоморфологических исследований.

Список источников

1. Александровский А. Л., Гласко М. П. Взаимодействие аллювиальных и почвообразовательных процессов на разных этапах формирования пойм равнинных рек в голоцене (на примере рек центральной части Восточно-Европейской равнины) // Геоморфология. — 2014. — № 4. — С. 3–17.
2. Асеев А. А. Палеогеография долины средней и нижней Оки в четвертичный период. — М. : Изд-во АН СССР, 1959. — 199 с.
3. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв. — М. : Агропромиздат, 1986. — 416 с.

4. Воробьев А. Ю., Кадыров А. С. Полевые исследования отступания берегов русла р. Оки в 2014–2018 гг. с помощью метода простых реперов // Географический вестник. — 2020. — № 3 (54). — С. 30–45.
5. Вуколов Э. А. Основы статистического анализа : практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. — М. : ФОРУМ, 2008. — 464 с.
6. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. — М. : Стандартинформ, 2020. — 41 с.
7. Далматов Б. И. Механика грунтов, основания и фундаменты. — Л. : Стройиздат, 1988. — 415 с.
8. Егоров И. Е. Экзогенные геоморфологические процессы и методы их изучения. — Ижевск : Изд-во Удмуртского ун-та, 2017. — 384 с.
9. Завадский А. С., Лобанов Г. В., Петухова Л. Н. [и др.]. Результаты стационарных исследований русловых процессов на реках ЕТР // Эрозионные и русловые процессы / под ред. Р. С. Чалова. — М., 2010. — С. 220–251.
10. Кривцов В. А., Воробьев А. Ю. Особенности пространственной организации и формирования локальных морфологических комплексов в пределах поймы реки Оки на ее рязанском участке // Вестник Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина. — 2014. — № 1 (42). — С. 142–155.
11. Лазаренко А. А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны, Оки). — М. : Наука, 1964. — 236 с.
12. Муромцев Н. А., Мажайский Ю. А., Семенов Н. А. [и др.]. Почвы долин рек Оки и Угры и их продуктивность : моногр. — Рязань : РГАТУ им. проф. П. А. Костычева, 2011. — 203 с.
13. Панин А. В., Сидорчук А. Ю. Макроизлучины («большие меандры»): проблемы происхождения и интерпретации // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. — 2006. — № 6. — С. 14–22.
14. Селиванов Ю. И., Сидоров И. В., Алексеев Н. Г. Опыт двустороннего регулирования водного режима минеральных почв Приокской поймы // Мелиорация земель Мещерской низменности. — Рязань : Моск. рабочий, 1974. — С. 68–73.
15. Смирнова Е. А., Лобанов Г. В., Бастраков Г. В. Влияние прочностных характеристик грунтов на интенсивность русловых деформаций в среднем течении р. Десны // Геоморфология. — 2009. — № 2. — С. 75–84.
16. Теории и методы физики почв : коллективная моногр. / под ред. Е. В. Шеина, Л. О. Карпачевского. — М. : Гриф и К, 2007. — 616 с.
17. Эрозионно-русловые системы / под ред. Р. С. Чалова, В. Н. Голосова, А. Ю. Сидорчука. — М. : ИНФРА-М, 2017. — 702 с.
18. Bouhmadouche M., Hemdane Y. Erosion of a sandy coast: continuous follow-up of the coastal groynes of protection in Boumerdes (Algeria) // Environmental Earth Sciences. — 2016. — Vol. 75. — P. 866.
19. Charlton R. Fundamentals of fluvial geomorphology. — L. : Routledge, 2008. — 234 p.
20. Couper P. R., Maddock I. P. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK // Earth Surface Processes and Landforms. — 2001. — Vol. 26, iss. 6. — Pp. 631–646.
21. Donovan M., Miller A., Baker M., Gellis A. Sediment contributions from floodplains and legacy sediments to Piedmont streams of Baltimore County, Maryland // Geomorphology. — 2015. — Vol. 235. — Pp. 88–105.
22. Facies Models. Response to sea level change / ed. by R. G. Walker, N. P. James. — Geological Association of Canada, 1992. — 409 p.
23. Miall A. Fluvial Depositional Systems. — Springer Geology, 2014. — 316 p.
24. Taghavi M., Dovoudi M. H., Amiri-Tokaldany E., Darby S. E. An analytical method to estimate failure plane angle and tension crack depth for use in riverbank stability analyses // Geomorphology. — 2010. — Vol. 123, iss. 1–2. — Pp. 74–83.

References

1. Alexandrovsky A. L., Glasko M. P. Interaction of alluvial and soil formation processes at different stages of the floodplains development during the Holocene (on the example of rivers in the central part of the East European Plain). *Geomorfologiya* [Geomorphology]. 2014, iss.4, pp. 3–17. (In Russian).
2. Aseev A. A. *Paleogeography of the middle and lower Oka Valley in the Quaternary period*. Moscow, AN SSSR Publ., 1959, 199 p. (In Russian).
3. Vadygina A. F., Korchagina Z. A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* [Methods of investigation of physical properties of soils]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1986, 416 p. (In Russian).
4. Vorobyov A. Yu., Kadyrov A. S. Field studies of the Oka River bank erosion in 2014–2018 using the erosional pins method. *Geographicheskyy vestnik* [Geographical bulletin]. 2020, iss. 3 (54), pp. 30–45. (In Russian).
5. Vukolov E. A. *Osnovy statisticheskogo analiza: praktikum po statisticheskym metodam i issledovaniyu operatsiy s ispolzovaniem paketov STATISTICA i EXCEL* [Basics of statistical analysis: a workshop on statistical methods and operations research using STATISTICA and EXCEL packages]. Moscow, FORUM Publ., 2008, 464 p. (In Russian).

6. GOST 25100–2020. *Grunty. Classifikatsiya*. [GOST 25100–2020. Soils. Classification]. Moscow, Standartinform, 2020, 41 p. (In Russian).
7. Dalmatov B. I. *Mechanika gruntov, osnovaniya i fundamenty* [Soil mechanics, bases and foundations]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1988, 415 p. (In Russian).
8. Egorov I. E. *Ekzogennyye geomorfologicheskiye processy i metody ich izucheniya* [Exogenous geomorphological processes and methods of their study]. Izhevsk, Udmurtskiy University Publ., 2017, 384 p. (In Russian).
9. Zavadsky A. S., Lobanov G. V., Petukhova L. N. Results of stationary research of riverbed processes on the rivers of European Russia. *Erosionnyye i ruslovyye processy*. [Erosion and riverbed processes]. Ed. R. S. Chalov. Moscow, 2010, pp. 220–251. (In Russian).
10. Krivtsov V. A., Vorobyev A. Yu. Spatial patterns and formation of floodplain morphology of the Oka River in the Ryazan Region. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo universiteta imeny S. A. Yesenina* [Bulletin of Ryazan State University named for S. A. Yesenin]. 2014, iss. 1 (42), pp. 142–155. (In Russian).
11. Lazarenko A. A. *Litologiya alluviya ravninnykh rek gumidnoy zony (na primere Dnepra, Desny, Oky)* [Lithology of alluvium of lowland rivers in humid areas (namely, the Dnieper, Desna, Oka)]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 236 p. (In Russian).
12. Muromtsev N. A., Mazhaysky Yu. A., Semenov N. A. *Pochvy dolin rek Oky i Ugry i ikh produktivnost: monografiya* [Soils of the Oka and Ugra river valleys and their productivity: monograph]. Ryazan, RGATU im. prof. P. A. Kostycheva Publ., 2011, 203 p. (In Russian).
13. Panin A. V., Sidorchuk A. Yu. Macromeanders (“big meanders”): problems of their origin and interpretation. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5, Geografiya* [Bulletin of Moscow University. Ser. 5, Geography]. 2006, iss.6, pp. 14–22. (In Russian).
14. Selivanov Yu. I., Sidorov I. V., Alekseev N. G. Analysis of bilateral regulation of the water regime of mineral soils of the Oka River floodplain. *Melioratsya zemel Mecherskoy nizmennosti* [Land reclamation of the Meshchera lowland]. Ryazan, Moskovskiy Rabochiy monograph, 1974, pp. 68–73. (In Russian).
15. Smirnova E. A., Lobanov G. V., Bastrakov G. V. Impact of soil hardness on riverbed deformation in the middle reach of the River Desna. *Geomorfologiya* [Geomorphology]. 2009, iss. 2, pp. 75–84. (In Russian).
16. *Teorii i metody fiziki pochv: kollektivnaya monografiya* [Theories and methods of soil physics: collective monograph]. Ed. E. V. Schein, L. O. Karpachevskiy. Moscow, Grif i K Publ., 2007, 616 p. (In Russian).
17. *Erosiyno-ruslovyye sistemy* [Catchment erosion-fluvial systems]. Ed. R. S. Chalov, V. N. Golosov, A. Y. Sidorchuk. Moscow, INFRA-M Publ., 2017, 702 p. (In Russian).
18. Bouhmadouche M., Hemdane Y. Erosion of a sandy coast: continuous follow-up of the coastal groynes of protection in Boumerdes (Algeria). *Environmental Earth Sciences*. 2016, vol. 75, p. 866.
19. Charlton R. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. L., Routledge, 2008, 234 p.
20. Couper P. R., Maddock I. P. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001, vol. 26, iss. 6, pp. 631–646.
21. Donovan M., Miller A., Baker M., Gellis A. Sediment contributions from floodplains and legacy sediments to Piedmont streams of Baltimore County, Maryland. *Geomorphology*. 2015, vol. 235, pp. 88–105.
22. *Facies Models. Response to sea level change*. Ed. by R. G. Walker, N. P. James. Geological Association of Canada, 1992, 409 p.
23. Miall A. *Fluvial Depositional Systems*. Springer, Geology, 2014, 316 p.
24. Taghavi M., Dovoudi M. H., Amiri-Tokaldany E., Darby S. E. An analytical method to estimate failure plane angle and tension crack depth for use in riverbank stability analyses. *Geomorphology*. 2010, vol. 123, iss. 1–2, pp. 74–83.

Информация об авторах

Воробьев Алексей Юрьевич — кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры географии, экологии и природопользования Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: динамическая геоморфология, палеогеография плейстоцена и голоцена окского бассейна, русловые процессы равнинных рек, осадконакопление в речных долинах, история заселения пойменных территорий, методика полевых геоморфологических исследований.

Кадыров Александр Сергеевич — техник-лаборант кафедры географии, экологии и природопользования Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: динамическая геоморфология, русловые процессы равнинных рек, осадконакопление в речных долинах, история заселения пойменных территорий, методика полевых геоморфологических исследований.

Балобина Анна Александровна — студент кафедры географии, экологии и природопользования Рязанского государственного университета имени С. А. Есенина.

Сфера научных интересов: динамическая геоморфология, русловые процессы равнинных рек, осадконакопление в речных долинах, история заселения пойменных территорий, методика полевых геоморфологических исследований.

Information about the authors

Vorobyov Alexey Yuryevich — candidate of geography, senior lecturer, Department of Geography, Ecology and Nature Management, Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: dynamic geomorphology, Pleistocene and Holocene paleogeography of the Oka River basin, river bed processes in lowland rivers, sedimentation in river valleys, history of settlement of floodplain territories, methods of field geomorphological studies.

Kadyrov Aleksandr Sergeevich — laboratory technician of the Department of Geography, Ecology and Nature Management, Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: dynamic geomorphology, channel processes of lowland rivers, sedimentation in river valleys, history of settlement of floodplain territories, methods of field geomorphological studies.

Balobina Anna Aleksandrovna — student of the Department of Geography, Ecology and Nature Management, Ryazan State University named for S. A. Yesenin.

Research interests: dynamic geomorphology, channel processes of lowland rivers, sedimentation in river valleys, history of human settlement in floodplain territories, methods of field geomorphological studies.

Статья поступила в редакцию 01.07.2023; принята к публикации 15.09.2023.

The article was submitted 01.07.2023; accepted for publication 15.09.2023.