

Оригинальная статья

УДК 551.4.013+551.4.023

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.154-180>**Опыт классификации отложений на эрозионных берегах реки Оки по их гранулометрическому составу****А.Ю. Воробьев¹✉, А.С. Кадыров¹, Е.В. Бургов^{2,3}, Д.С. Локтеев⁴, А.А. Балобина⁵**¹Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, г. Рязань, Россия²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия³Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова Российской академии наук, г. Москва, Россия⁴Московский государственный университет геодезии и картографии, г. Москва, Россия⁵Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия✉ a.vorobyov90@mail.ru**Аннотация**

Представлены результаты обзора литологического разнообразия грунтов в днище долины реки Оки на ее рязанском участке. В ходе полустационарных исследований рельефообразующих процессов произведен отбор 231 пробы отложений на пойменных русловых склонах с выраженным эрозионным рельефом. Дополнив отбор геологического материала фиксацией топографии с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), удалось разместить на продуктах геоинформационного моделирования границы осадочных фаций, вскрывающихся на эрозионных откосах геоморфологических полустационаров. Гранулометрический анализ гидравлическим и ситовым методами и анализ распределения в геологических телах крупного кластического материала стали основой для оценки механического состава рельефа окских берегов. Соотношение песка, алевролита и глины с помощью кластеризации и машинного обучения показало, что все разнообразие мелкообломочных грунтов может быть сведено к 4–5 гомогенным группам. Четыре предложенных гранулотипа пойменных разрезов с характерным залеганием ледниковых и аллювиальных фаций могут стать геолого-геоморфологическим компонентом прикладного моделирования при уточнении общих региональных оценок скорости горизонтальных русловых деформаций.

Ключевые слова: пойма, река Ока, грунт, гранулометрический анализ, БПЛА, машинное обучение, геологическая фация.

Благодарности. Исследование проведено за счет средств гранта Российского научного фонда № 22-77-00050, <https://rscf.ru/project/22-77-00050/>.

Для цитирования: Воробьев А.Ю., Кадыров А.С., Бургов Е.В., Локтеев Д.С., Балобина А.А. Опыт классификации отложений на эрозионных берегах реки Оки по их гранулометрическому составу // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 1. С. 154–180. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.154-180>

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.154-180>

Classification of sediments on the exposed banks of the Oka River using granulometric composition

A.Y. Vorobyov¹✉, A.S. Kadyrov¹, E.V. Burgov^{2,3}, D.S. Lokteev⁴, A.A. Balobina⁵

¹Ryazan State University named for S. Yesenin, Ryazan, Russia

²National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

³A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

⁵Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

✉a.vorobyov90@mail.ru

Abstract

An overview of the lithological diversity of soils at the bottom of the Oka River valley, particularly its Ryazan section, was performed. In a semi-stationary study of the geomorphic processes, a total of 231 soil samples were collected from the channel slopes with distinct erosion patterns. The geological data were supplemented by topographic mapping with unmanned aerial vehicles (UAVs), during which the boundaries of sedimentary facies on the exposed banks of the semi-stationary areas were identified and delineated in the GIS products. Granulometric analysis by the hydraulic and sieving methods, along with the analysis of the distribution of coarse clastic material within the geological strata, was carried out to determine the mechanical composition of soils on the Oka River banks. Based on the ratio of sand, silt, and clay measured through clustering and machine learning, the fine clastic soils were classified into four to five homogeneous groups. Four granulotypes of floodplain sections, each with a distinct occurrence of glacial and alluvial facies, can serve as a valuable geological and geomorphological element for applied modeling in regional estimates of horizontal channel deformation rates.

Keywords: floodplain, Oka River, soil, granulometric analysis, UAV, machine learning, geological facies

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-77-00050, <https://rscf.ru/project/22-77-00050/>).

For citation: Vorobyov A.Y., Kadyrov A.S., Burgov E.V., Lokteev D.S., Balobina A.A. Classification of sediments on the exposed banks of the Oka River using granulometric composition. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 1, pp. 154–180. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.1.154-180>. (In Russian)

Введение

В геологии и седиментологии считается, что осадочная оболочка Земли имеет иерархическую структуру, разделяясь на седиментационные циклы, слои и отдельные частицы [1–4]. Последние при этом имеют свой гранулометрический индекс. Общепринятое разделение обломочных осадочных пород на типы, классы и семейства основано на определении содержания групп размерности твердых частиц [2, 5, 6]. Современное землепользование невозможно без оценки территориальной приуроченности ареалов преобладающих типов грунтов. Строительная, транспортная и аграрная отрасли хозяйства требуют достоверной и детализированной прикладной информации о литологии отложений, однако ее геопространственное предсказание может стать сложной задачей из-за многофакторности процесса осадконакопления. На уровне макрорегионов оно подчиняется глобальным географическим закономерностям, создавая типичные морфолитотипы для каждой природной зоны [7]. Распространение экзогенных геологических процессов в условиях гумидного умеренного климата с устойчивым поверхностным стоком регулируется динамикой эрозионно-русловых систем речных бассейнов [8, 9], на которые естественным образом фрагментируется геопространство. Вовлеченность твердофазного вещества в ежегодный флювиальный перенос заставляет рассматривать гранулометрический состав отложений на большинстве бассейновых позиций в контексте процессов эрозии, транспорта и аккумуляции наносов.

Не только современное рельефообразование, но и геологическая динамика развития рельефа является причиной пространственной изменчивости его литологии. Так, четвертичная эволюция геоконплексов центра Русской равнины представляет собой чередование ледниковых хронов и более теплых эпох, для междуречий типичны лессово-почвенно-криогенные серии, подстилаемые моренами, водно-ледниковыми осадками, реже – древними аллювиальными толщами [7, 10–12]. Помимо комплексов рельефа в автономных позициях, выделяются геодинамически более напряженные склоновые и пойменные морфолитосистемы [12]. Последние аналогичны пойменным звеньям интегральных флювиальных систем и, нередко территориально обособляя значительные земельные, почвенные и биологические ресурсы, являются крупными депо наносов [8, 9, 13–15].

Рельеф и осадки многих речных долин бассейна р. Волги многократно описывались ранее [16–20], однако данные на пойменно-русловых участках часто обрывочны из-за высокой интенсивности литодинамики и крупного территориального масштаба геоморфологических исследований. Совместный вклад палеогеографических, гидродинамических и синлитогенных эдафических тенденций в развитие рельефа супераквальных ландшафтных позиций делает его гранулометрический состав весьма высокочастотной переменной для генерализованных пространственных прогнозов. Тем не менее, на крупных реках Русской равнины сохраняется преобладание аллювиальных осадков, традиционно подразделяемых на базальные, русловые, пойменные и старичные толщи [20, 21]. В ряде отраслевых дисциплин признается невозможность получения прикладных оценок геоэкологической устойчивости какой бы то ни было территории в отрыве от учета комплекса геолого-геоморфологических факторов морфолитосистемы, среди которых ее стратиграфия, вещественный состав и физико-механические свойства считаются определяющими [6, 13, 18, 22–27].

Пойма р. Оки в ее среднем течении представляет совокупность локальных морфологических комплексов (пойменных генераций), отложения которых запечатлели следы плейстоцен-голоценовой русловой морфодинамики и в то же время являются продуктом денудации

водосборов окских притоков [11, 21, 28, 29]. На данном участке встречаются все три основных морфодинамических типа русла, среди которых преобладает меандрирование, ограниченное либо свободное. Фронты размыва излучин занимают до 15 % береговой линии русла р. Оки между устьями р. Москвы и Мокши. Дополнительным фактором дестабилизации береговых склонов в регионе является добыча песчано-гравийной смеси в русловых карьерах [18, 30]. Несмотря на наличие общих оценок ежегодной динамики горизонтальных русловых деформаций [17], региональные прогнозы потери пойменного земельного фонда до сих пор не предложены. Затруднения обусловлены в том числе недостатком информации о литологии пойменных отложений, поскольку общеизвестны причинно-следственные связи между скоростью и преобладающими механизмами разрушения берегов рек и их гранулометрическим составом [6, 8, 18, 23, 25, 31–33].

Для регулярного получения аналитической информации в динамической геоморфологии рекомендуется заложение стационаров и полустационаров [12, 31]. В ряде случаев, прогноз боковой эрозии рек может основываться и на экспериментах по методу размывающей струи [27, 34]. В отличие от экспериментальных русловых створов, на постоянных учетных площадках возможна регулярная фиксация морфологии поверхности и построение трехмерных моделей геологических тел пойменных массивов. Цель настоящей работы состоит в инвентаризации вещественного состава осадков в форме гранулотипов, наиболее часто встречающихся в границах полустационаров на эрозионных берегах р. Оки. Оценка разнообразия пойменных отложений потребовала выбора наиболее подходящей номенклатуры для обломочных фракций осадков, понятной и доступной для широкого круга специалистов. Для описания структурно-морфологического и литологического облика берегов на учетных площадках использованы актуальные геодезические технологии для получения позиционных данных, отбор геологического полевого материала и статистические методы. Хотя обычно считается, что литология откосов играет второстепенную роль в деформациях русла по сравнению с составом его донных отложений [8, 18, 25, 35], предполагается, что фациальная структура склонов русла р. Оки предоставит полезную информацию для моделей берегового рельефообразования.

1. Район исследования

Окский бассейн имеет площадь 245 тыс. км². К его средней части относится фрагмент долины главной реки между устьями р. Москвы и Мокши (850–303 км от устья р. Оки) вместе с долинами и водосборами притоков. Средний годовой расход главной реки на створе «Половское» (рис. 1) за последние 15 лет составляет 530 м³/с, а среднемаксимальная водность – 4500 м³/с. Главная река бассейна в среднем течении является крупным водотоком с восточноевропейским типом гидрографа. Ежегодно волны весенних паводков производят значительную эрозионную работу, сокращая площадь высокой поймы. Ожидаемая среднегодовая скорость боковой эрозии окского русла достигает 1.0–4.0 м [17], но встречаются упоминания о катастрофически быстрых размывах берегов в XIX–XX вв. [20, 36]. Значимым фактором геоморфологического риска является средняя крупность отложений смоченного периметра русла. Представления о ней в районе исследования основываются, главным образом, на показателях донных отложений отдельных створов или участков дна [21, 30]. Следуя международной классификации [4, 15, 26, 31], можно заключить, что по составу донных отложений р. Ока относится к классу песчаных рек (D_{50} дна около 0.4–1.0 мм [30]).

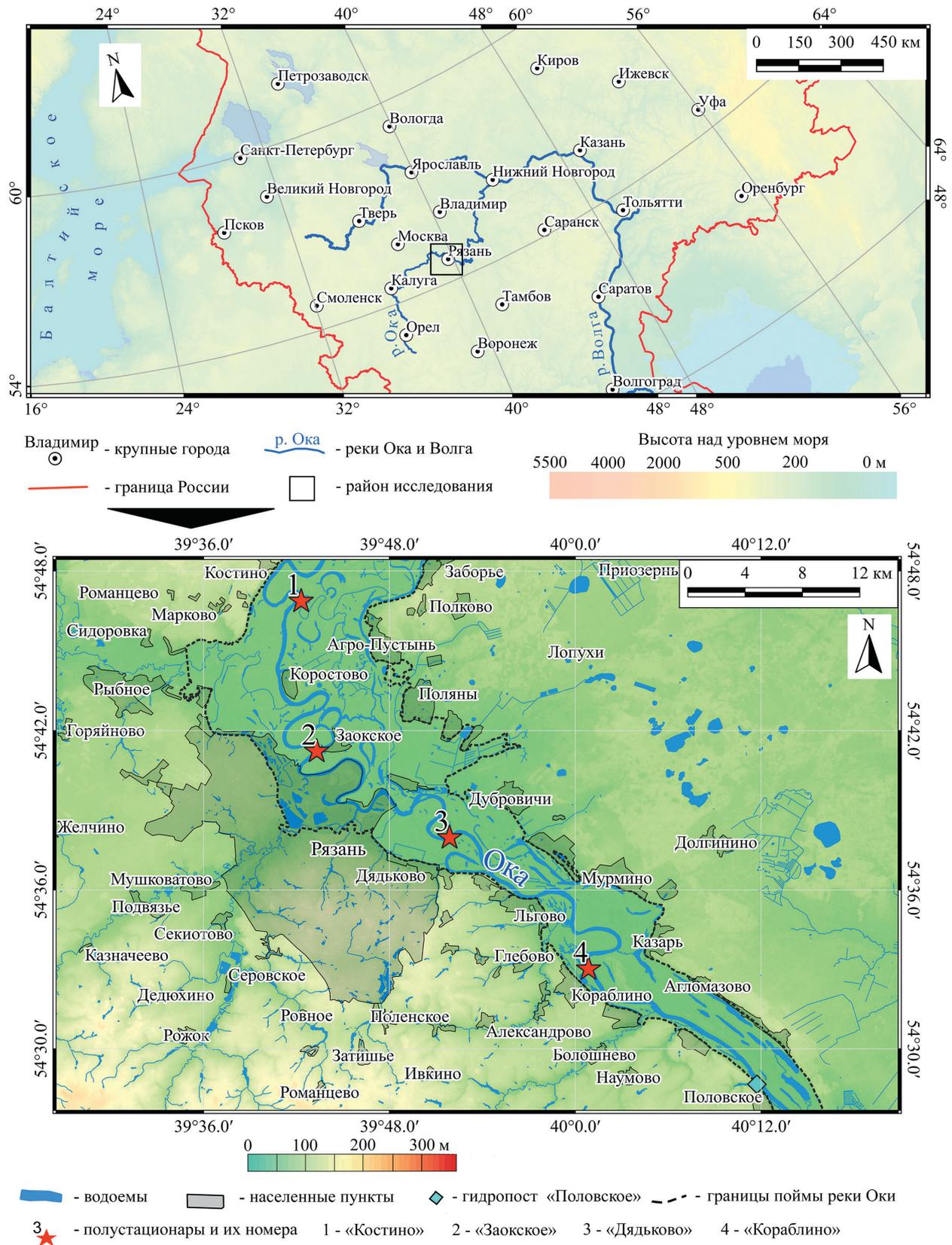


Рис. 1. Расположение геоморфологических полустационаров в окрестностях г. Рязани

Fig. 1. Location of the geomorphological semi-stationary areas in the vicinity of Ryazan

Геологическое строение окской долины в ее среднем течении исследовалось с конца XIX в. [20, 21, 37]. Полная сводка об актуальной на конец 1990-х гг. структурно-геологической, литологической и палеогеографической информации дана В.А. Кривцовым [10]. Долина на участке исследования имеет ассиметричный профиль – крутизна правого борта достигает 90° на стенках срыва оползней и относительную высоту до 50 м над днищем. Пологий левый борт плавно переходит в плейстоценовые озерно-аллювиальные и аллювиальные осадки Мещерской низменности, слагающие террасовый комплекс. Четкие границы левобережной поймы на рязанском участке не выражены, ширина днища долины достигает 8–10 км, средняя абсолютная высота – 96.2 м. Ширина пояса современного меандрирования колеблется от 1.5 до 4.0 км. Преобладает меандрирующий морфодинамический тип русла (77 % протяженности водотока), реже встречаются прямолинейные участки (23 %). Вершины и крылья трех излучин осложнены островными разветвлениями. Из 20 меандров только 2 испытывают смещение, ограниченное коренными бортами долины, до 95 % эрозионно опасных фрагментов русла сосредоточено на вогнутых берегах свободных излучин.

Согласно данным геологического бурения [10, 11], четвертичные рыхлые осадки представлены пойменной (aIVp), русловой (aIVr) и старичной (aIVs) фациями аллювия совокупной мощностью до 10–15 м. Несмотря на значительный опыт агротехнических и мелиоративных мероприятий [18, 19, 24, 36], информация о механическом составе грунтов на большинстве пойменных генераций отсутствует. По классической схеме Е.В. Шанцера, развитой А.А. Лазаренко [20, 21], в том числе на основе литологических исследований плейстоцен-голоценовых осадков окской поймы, aIVp сложена суглинками и супесями. Руслообразующие пески (местами с примесью гравия) в понижениях рельефа нередко отделены от осадков aIVr старичными линзами. Обычны, особенно в границах молодых генераций гривистого рельефа, и смешанные, пойменно-русловые, отложения (субфации прирусловых валов и приречной поймы (aIVpr)). Механизм их формирования включает различные способы транспортировки твердофазного материала, одновременное участие в приречной аккумуляции влекомых и взвешенных наносов, что отражается в гранулометрическом составе и текстурно-структурных признаках. Новейшие исследования в регионе [38] свидетельствуют о сходном механическом составе перечисленных аллювиальных фаций и в днище долины р. Мокши.

2. Методы исследования

Все четыре полустационара были заложены в пределах рязанского участка (Рязанского расширения) поймы р. Оки (рис. 1). Циклы полевых работ на учетных площадках приурочены, главным образом, к теплomu времени года. На береговых уступах учетных площадок, вскрытых флювиальными, склоновыми, зоогенными и антропогенными рельефообразующими процессами, был отобран 231 образец грунтов. Аэрофотосъемка, заложение шурфов и зачисток естественных обнажений, полевые зарисовки и геодезические измерения стали фактической основой для драпировки растров цифровых моделей рельефа (ЦМР) фациальными ареалами (рис. 2). Позиции точек отбора соответствуют субфациям погребенных прирусловых валов и приречной поймы, центральной поймы, а также центральных частей стариц [4, 21]. Косослоистые пачки aIVr в настоящем исследовании исключены из аналитической работы, поскольку они обнаружены на урезе реки либо еще глубже.

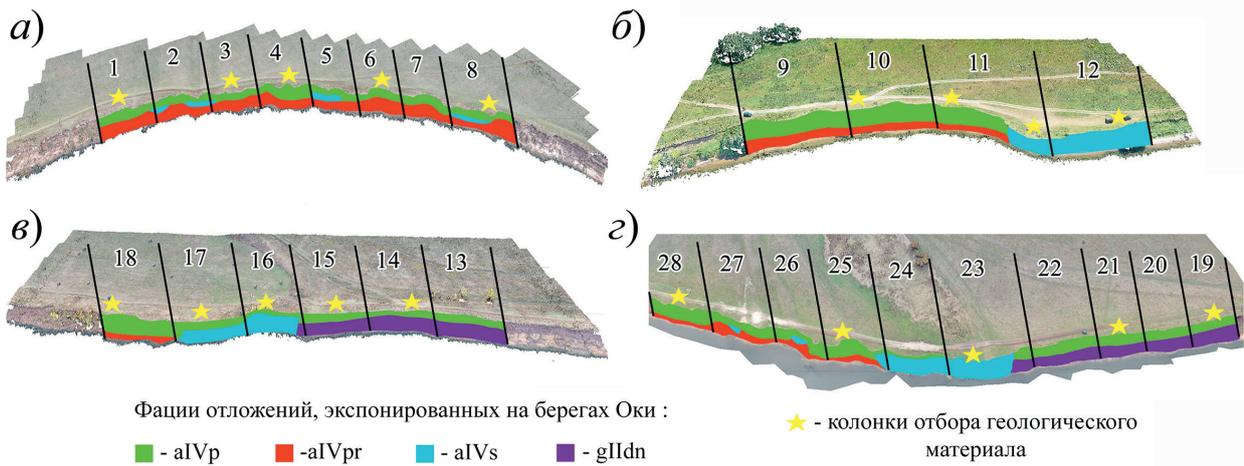


Рис. 2. Фациальная структура полустационаров, их границы и номера секторов: а) «Костино»; б) «Заокское»; в) «Дядьково»; г) «Кораблино»

Fig. 2. Facies structure of the semi-stationary areas, with boundaries and sector numbers: а) “Kostino”; б) “Zaokskoe”; в) “Diad’kovo”; г) “Korablino”

Методика формирования ЦМР реализована с учетом практики подобных исследований в России [22] и за рубежом [39]. Беспилотный летательный аппарат DJI Mavic 2 оснащен собственным GNSS-приемником. С помощью второго приемника EFT M4 GNSS определяли координаты опорных знаков на земле в форме пластиковых и картонных пластинок с крестовыми метками. Съемку проводили в летне-осенний сезон 2022 г. после препарирования весенним паводком геологических тел полустационаров при руслонаполнении. Разрешение фотоматериалов, полученных камерой со CMOS-матрицей 4/3, составляло 4000×2500 пикселей. Для каждого стационара получено самостоятельное множество позиционированных точек (до 30 млн), набор ортофотопланов сформирован в программе Agisoft Metashape (Agisoft LLC, Россия).

Моделирование рельефа осуществляли с помощью AutoCAD (модуль Civil 3D) (Autodesk, Inc., США) на основе облаков точек. Выборку явно ошибочных элементов, как и выделение ареалов поверхности с неодинаковым участием растительного покрова в поверхности цифровой модели местности, проводил оператор. Переход от цифровой модели местности к полноценной ЦМР выполнен в полуавтоматическом режиме. Вертикальное и горизонтальное разрешение продуктов моделирования составляло 1.3 см, ряд позиций для заложения колонок отбора проб выбирали только после крупномасштабной геоинформационной визуализации рельефа. Полустационары по своей длине фрагментировали на 28 отрезков (секторов) длиной по 50 метров. Колонки отбора проб и опорные шурфы были расположены в секторах № 1, 3, 4, 6, 8, 10–12, 14–18, 19, 21, 23, 25, 28. Каждый образец грунтов соотносили с местной системой координат МСК-62 зона 1 и с Балтийской системой высот 1977 г. для будущего обобщения геологической информации, полученной на различном удалении от окского русла, при формировании 3D-моделей геологических тел ключевых участков исследования.

Особенностью учетных площадок «Дядьково» и «Кораблино» является наличие пород ледникового генезиса, днепровской [7], или, по некоторым данным [40], донской морены (gII dn). Крупный кластический материал (валуны, щебень, дресва) разделены в теле гляциальной толщи коричнево-серым дисперсным заполнителем. Его механический состав неизвестен, так как морена ранее не подвергалась литологическому анализу вследствие

оригинальности места ее дислокации. Отбор полевого материала осуществляли точечным методом [2, 41, 42] в колонках с шагом 0.5 м по высоте в геоморфологически наиболее репрезентативных частях полустационаров, для которых сформированы ЦМР.

Механический состав полевого материала определяли с учетом его щебнистости и результатов гранулометрического анализа. Гранулометрический состав дисперсной части каждой пробы устанавливали гидравлическим методом (в ФГБУ «САС «Рязанская») в сочетании с ситованием. Для этого использовали мокрый ситовой метод гранулометрического анализа дисперсных грунтов (всего 18 сит), рекомендованный для пород, сложенных в значительной степени глинистыми песками [42]. Крупнообломочные фракции (рис. 3) выделяли в шлифах и сухим ситованием. Интегральный вид гранулометрического состава осадка отображали кумулятивной кривой [3, 5, 25, 35, 42], сглаживание которой между центрами тяжести для песчаных фракций проводили методом наименьших квадратов (рис. 4). Объем проб, взятых из шурфов и зачисток для определения содержания крупнообломочных разностей, составлял 15–50 кг, для анализа просеиванием – 0.5–2.0 кг, для пипеточного метода – менее 0.5 кг.

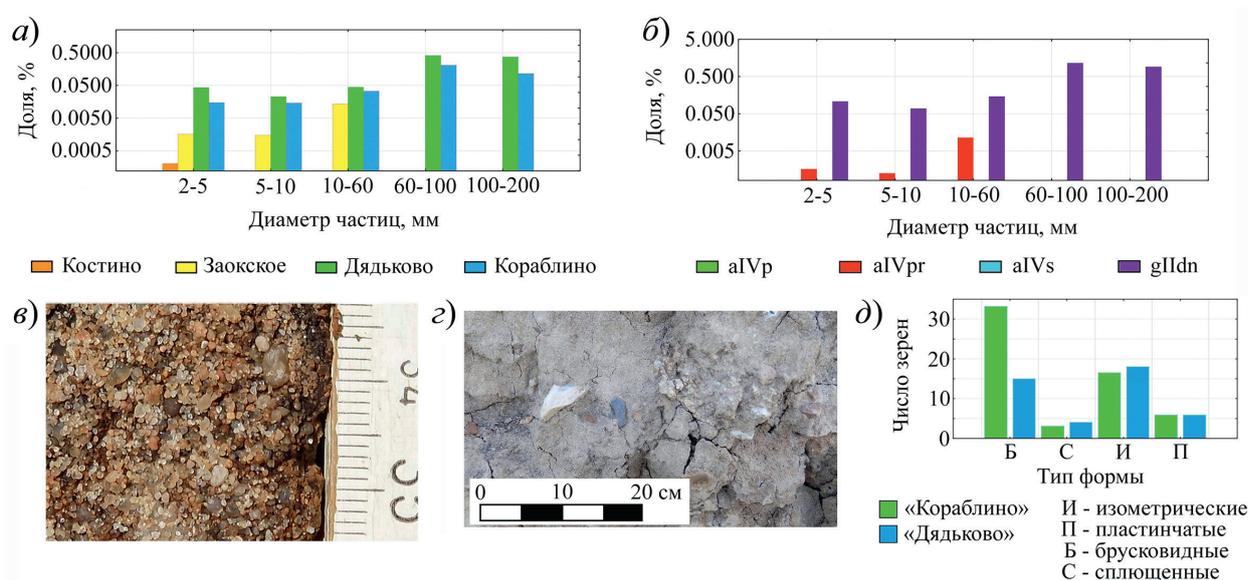


Рис. 3. Крупнообломочный компонент состава пойменных массивов на полустационарах: *а)* процентное содержание в отложениях; *б)* доля по фациям; *в)* выветрелый гравий и многочисленные зерна грубого песка, фация aIVpr, полустационар «Костино»; *г)* щебень с нарушенной фасеткой в смешанных продуктах эрозии, полустационар «Кораблино»; *д)* форма щебня из gII dn

Fig. 3. Coarse clastic component of the floodplain sediments in the semi-stationary areas: *a)* percentage content in the sediments; *b)* proportion by facies; *c)* weathered gravel and numerous grains of coarse sand, facies aIVpr, “Kostino” semi-stationary area; *d)* crushed stone with altered facets in mixed erosion products, “Korablino” semi-stationary area; *e)* shape of crushed stone from gII dn

В исследовании воспроизведен интегральный подход к типизации обломочных осадочных отложений с размерами частиц 0.001–2.0 мм, который объединяет отечественный [1, 28, 41, 42] и зарубежный [15, 25, 32, 35] опыт, исходя из объективных возможностей ситового и пипеточного методов гранулометрического анализа. Определена доля фракций в песчаном (0.06–2.0 мм), алевритовом (0.001–0.06 мм) и илистом (< 0.001 мм) размерном классах частиц. Крупнообломочный материал разделяли по общепринятой градации размерности [3, 6], второстепенное значение имела степень окатанности обломков. Ограниченное участие этой категории частиц в сложении геологических тел пойменных мас-

сивов выдвигает на первый план для фациально-генетической интерпретации сам факт их присутствия в отложениях. Тем не менее для всех 102 собранных галечно-щебнистых обломков была установлена форма через коэффициенты удлиненности (b/a) и уплощенности (c/b) [3, 12]. Морфоскопию проводили под бинокулярным микроскопом БМ-51-2 (АО «КОМЗ», Россия). Соответственно, были выделены типы сплюснутых ($b/a > 0.66$, $c/b < 0.66$), изометрических ($b/a > 0.66$, $c/b > 0.66$), пластинчатых ($b/a < 0.66$, $c/b < 0.66$) и брусковидных ($b/a < 0.66$, $c/b > 0.66$) зерен (рис. 3, д), что позволило сделать первичные выводы о механизме транспортирующей среды и фоновых условиях древней обстановки осадконакопления.

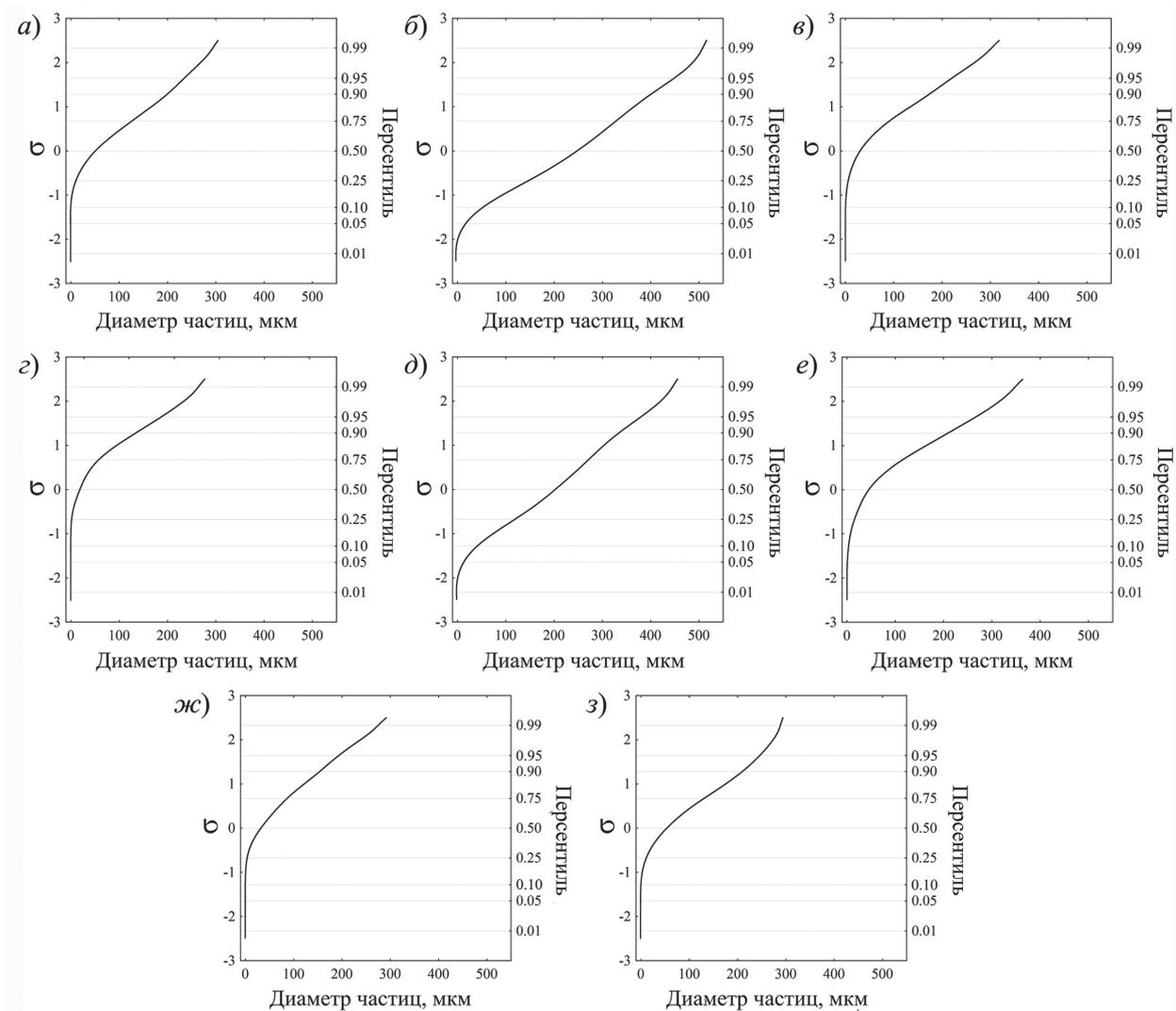


Рис. 4. Усредненные кумулятивные кривые гранулометрического состава отложений: а) aIVp; б) aIVpr; в) aIVs; г) gIIIdn; д) полустационар «Костино»; е) полустационар «Заокское»; ж) полустационар «Дядьково»; з) полустационар «Кораблино»

Fig. 4. Averaged cumulative granulometric curves of sediment composition: а) aIVp; б) aIVpr; в) aIVs; г) gIIIdn; е) “Kostino” semi-stationary area; ф) “Zaokskoe” semi-stationary area; г) “Diadkovo” semi-stationary area; h) “Korablino” semi-stationary area

Фациальную принадлежность пород на ключевых участках устанавливали в ходе полевых работ. Однако при экстраполяции литологических данных на другие участки окской поймы, вероятно, будет решаться обратная задача – распознавание фаций и субфаций от-

ложений по характерным интервалам содержания гранулометрических фракций. Решение легко может оказаться ошибочным, поскольку рельеф многих пойменных массивов полигенетичен: аллювиальное осадконакопление накладывалось на морфологические результаты иных рельефообразующих агентов (термокарст, лимно-аллювиальная аккумуляция, биогенный и ледниковый морфолитогенез) [16, 17, 19, 21, 30]. Кроме того, на постседиментационном этапе осадки часто перерабатывались почвообразованием в супераквальной или практически элювиальной обстановке [16, 21].

Предварительная оценка литологического разнообразия позволила оценить неоднородность множества отобранных проб по содержанию основных фракционных классов (например, суглинков и супесей). Для статистической обработки фактической информации использовали пакеты Statistica 10.0 (Dell Inc., США) и MatLab 8.1 (The MathWorks, Inc., США). Первичное разбиение информационного массива на группы, пригодные для качественной интерпретации (рис. 5), проводили эталонным центроидным методом k -средних и иерархическим кластерным анализом (метод Варда, дистанция Евклида) [43, 44].

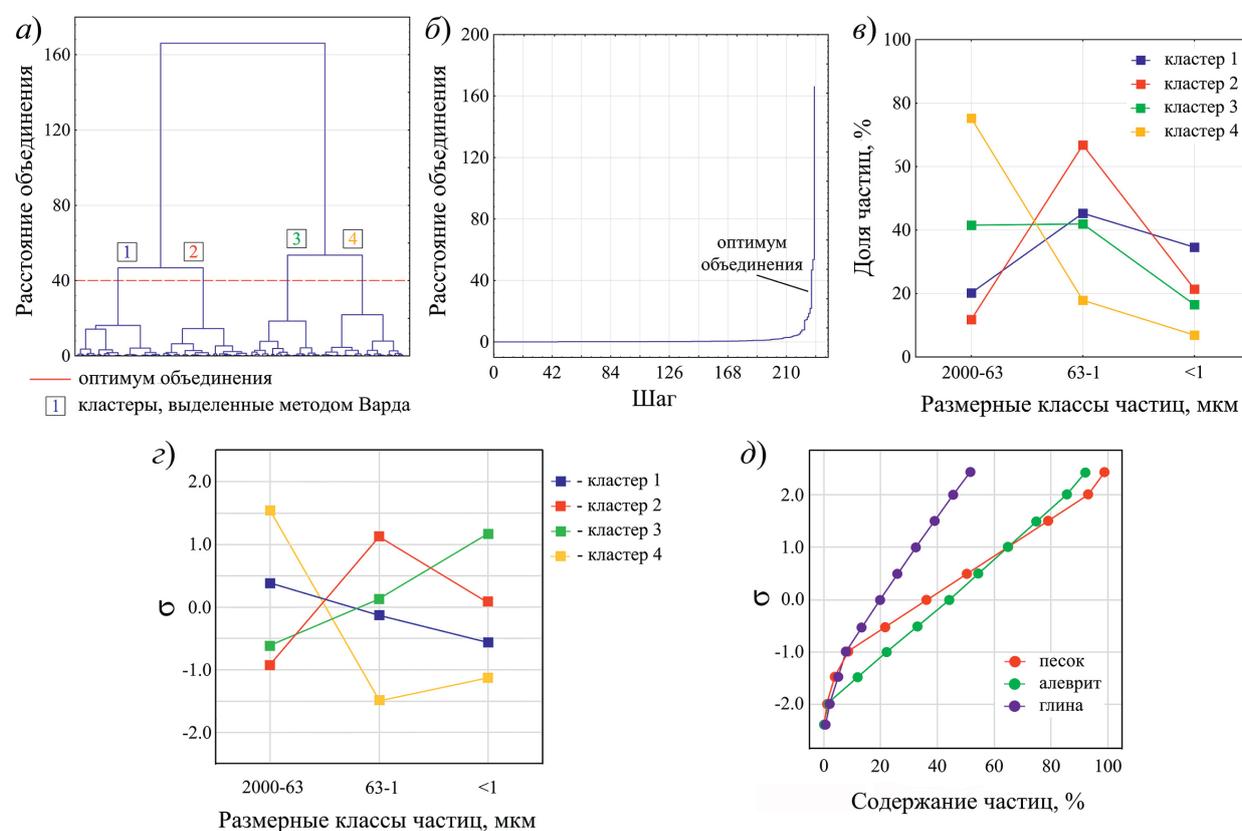


Рис. 5. Кластерный анализ проб грунтов по содержанию песка, алеврита и глины: *a*) дендрограмма иерархической кластеризации методом Варда, дистанция Евклида; *b*) график расстояния объединения кластеров; *в*) средние для кластеров, выделенных методом Варда; *г*) кластеры, выделенные по методу k -средних; *д*) рассеивание значений в размерных классах частиц, метод k -средних

Fig. 5. Cluster analysis of soil samples by sand, silt, and clay content: *a*) dendrogram of hierarchical clustering by Ward's method, Euclidean distance; *b*) cluster association distance plot; *c*) mean values for clusters selected by Ward's method; *d*) clusters selected by k -means method; *e*) scatter plot of values in the particle size classes, k -means method

Данные подготовлены к кластерному анализу путем стандартизации признаков – содержания песка, алевролита и глины. Стандартизация осуществлена в автоматическом режиме по формуле 1:

$$z_i = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (1)$$

где z_i – стандартизированное значение, x – абсолютное значение, μ – математическое ожидание, σ – стандартное отклонение. Довольно сильное искажение геометрии пространства путем Z -нормализации оправдано при использовании метода Варда, выделяющего кластеры по их дисперсиям. Рассеивание значений случайной величины (стандартное отклонение) в данном случае позволяет избежать необоснованного влияния масштаба объектов, которое может исказить результаты выбранного метода [43, 44].

Простые подходы к кластеризации дополнены одной из форм машинного обучения – алгоритмом k -ближайших соседей (k -Nearest Neighbors, k NN) [45]. Выбор оптимального решения о присвоении гранулометрического класса при обращении к геометрическим схемам Охотина, Ферре, Шепарда, Рухина и Пустовалова (рис. 6) основывался, в первую очередь, на точности кросс-валидации, проведенной методом Hold-out, предполагающим простое разделение модели на тренировочное множество, необходимое для обучения, и тестовое, на котором оцениваются результаты [44, 45]. Предполагается, что если гранулометрический треугольник хорошо отражает разнообразие грунтов, то предсказанное тестом распределение проб по гранулометрическим классам будет незначительно отличаться от наблюдаемых значений в тестовой выборке. Точность модели рассчитывали по матрице ошибок с помощью макро- (P_{macro}) и микроусреднения (P_{micro}) согласно формулам 2 и 3 соответственно.

$$P_{\text{macro}} = \frac{1}{K} \left(\frac{TP_1}{TP_1 + FP_1} \right) + \left(\frac{TP_2}{TP_2 + FP_2} \right) + \dots + \left(\frac{TP_n}{TP_n + FP_n} \right), \quad (2)$$

$$P_{\text{micro}} = \frac{\frac{1}{K} (TP_1 + TP_2 + \dots + TP_n)}{\frac{1}{K} (TP_1 + TP_2 + \dots + TP_n) + \frac{1}{K} (FP_1 + FP_2 + \dots + FP_n)}, \quad (3)$$

где K – число классов грунтов, TP – правильно предсказанная принадлежность к классу, FP – ошибочно предсказанная принадлежность к классу.

Оценка качества классификации методом макроусреднения показывает, насколько значим вклад малочисленных классов в точность модели, а второй критерий (микроусреднение) выравнивает ошибку по модели в целом. Перемешивание данных не проводили, поскольку порядок записей не имеет существенного значения. Объем тестовой выборки, установленный путем подбора, варьируется в диапазоне от 23 % (схемы Охотина и Шепарда) до 30 % (треугольник Пустовалова). Результаты проверки качества пяти классификаций представлены на гистограммах прогнозных и наблюдаемых значений вместе с вычисленными значениями P_{macro} и P_{micro} (рис. 7). Автоматизация поиска оптимального значения k -ближайших объектов для группировки визуализирована на двухосевых графиках.

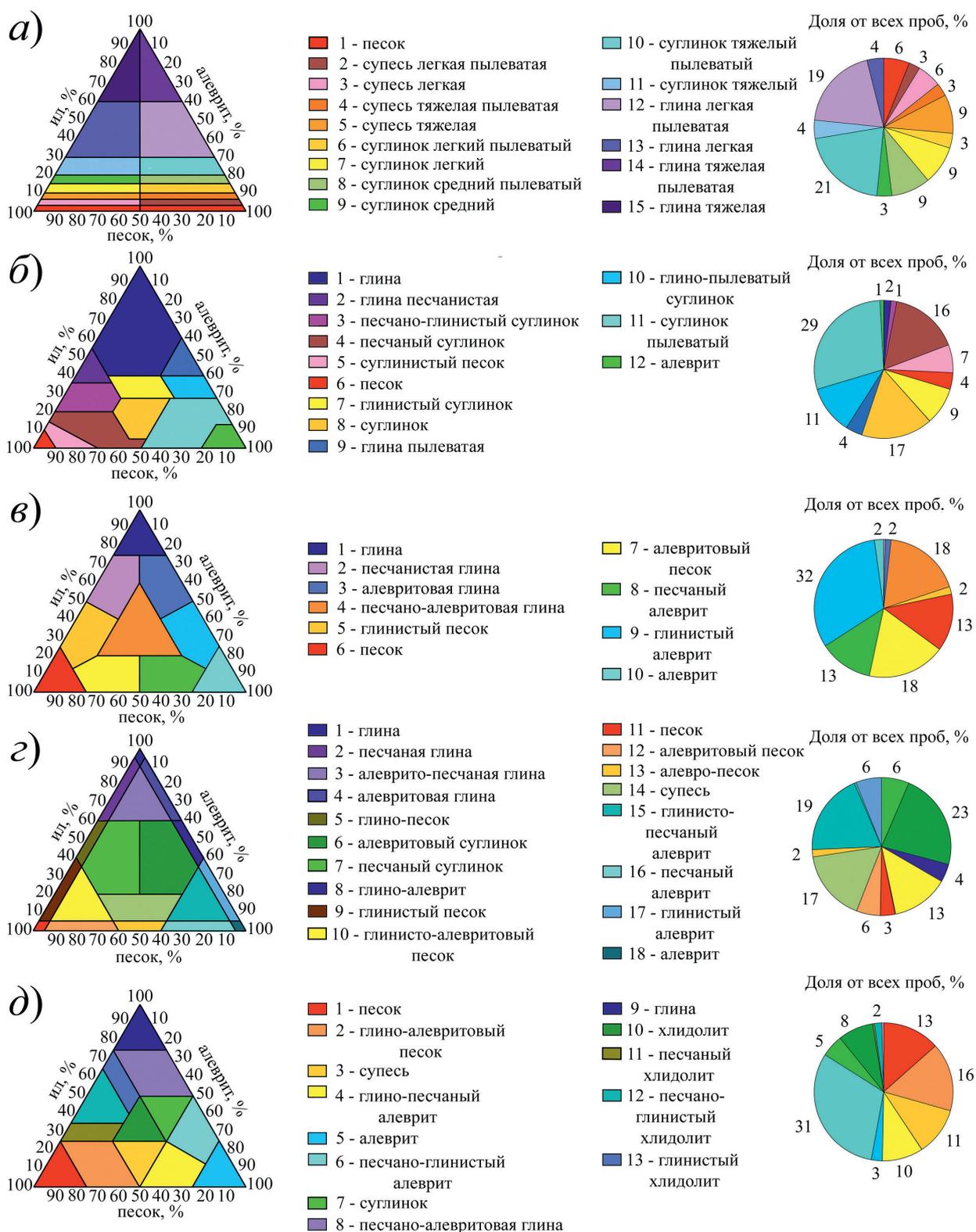


Рис. 6. Распределение проб грунтов на треугольниках: а) Охотина; б) Ферре; в) Шепарда; г) Рухина; д) Пустовалова

Fig. 6. Ternary diagrams showing the distribution of soil samples: а) Okhotin; б) Ferre; в) Shepard; г) Rukhin; д) Pustovalov

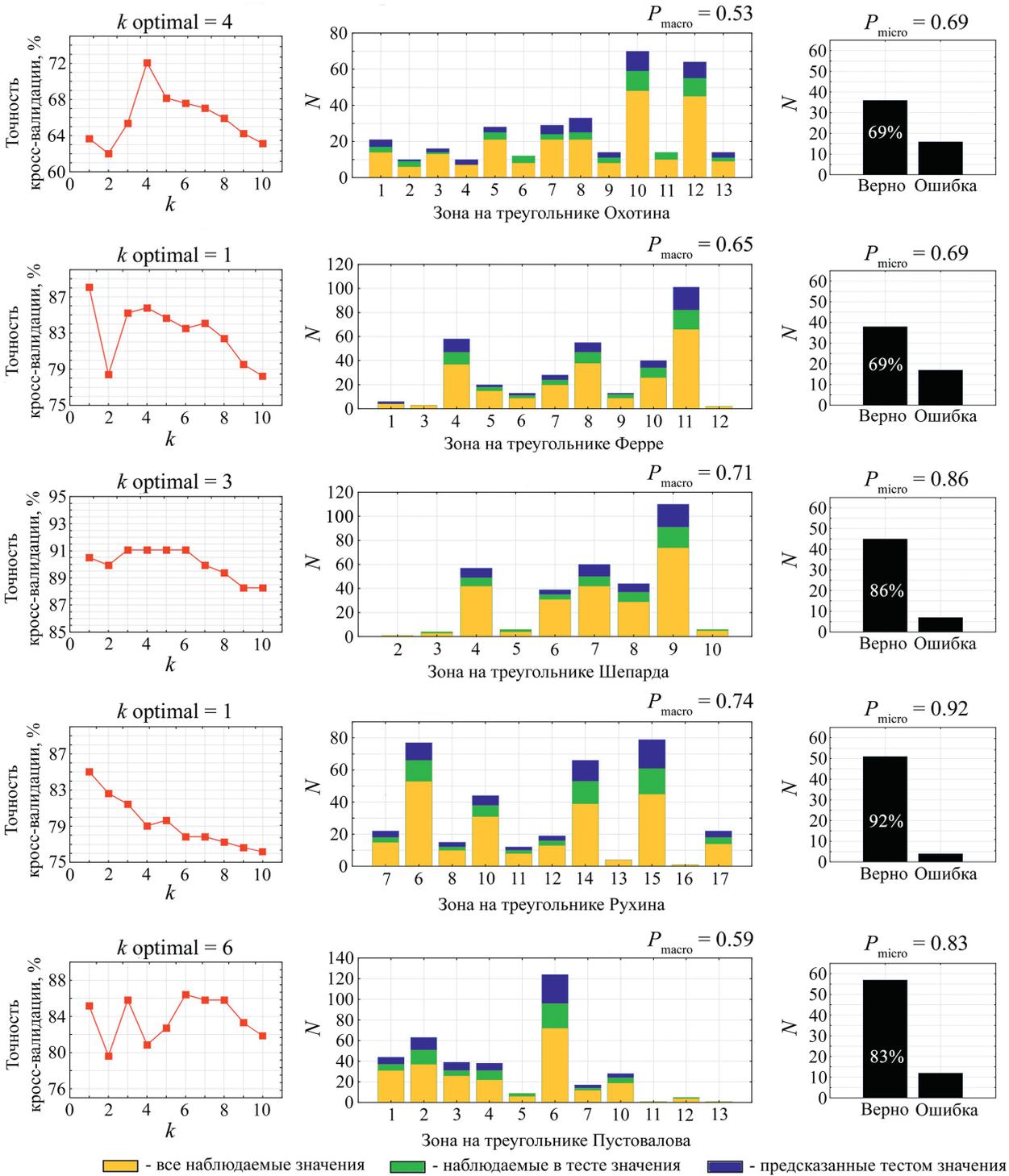


Рис. 7. Результаты обучения методом kNN (*k*-ближайших соседей) для выбора классификации гранулометрического состава грунтов

Fig. 7. Results of kNN (*k*-nearest neighbors) training for selecting the classification of soil granulometric composition

Определение содержания главных мелкообломочных фракций в составе геологического наполнения берегов позволит формализовать их литологию, представив ее изменчивость по длине русла в виде кода. Каждый километр берега может быть описан как фиксированное соотношение гранулотипов, для которых установлена оптимальная классификация мелко-

обломочных пород. Помимо фациально-структурных признаков рельефа, должна учитываться также высота пойменного откоса, являющаяся предиктором в некоторых формулах прогноза горизонтальных русловых деформаций [18, 23]. Четыре выделенных гранулотипа (рис. 8) на берегах-эталонах (сектора № 6, № 11, № 14 и № 23) соответствуют наиболее распространенным в Рязанском расширении поймы р. Оки генерациям наложенной и сегментно-гравистой поймы. Кодирование геолого-геоморфологической информации, значимой для гидролого-морфологического анализа, способно существенно повысить точность и универсальность прогнозов потерь местного земельного фонда, связав их с механическим составом как базовым свойством почв и осадочных пород.

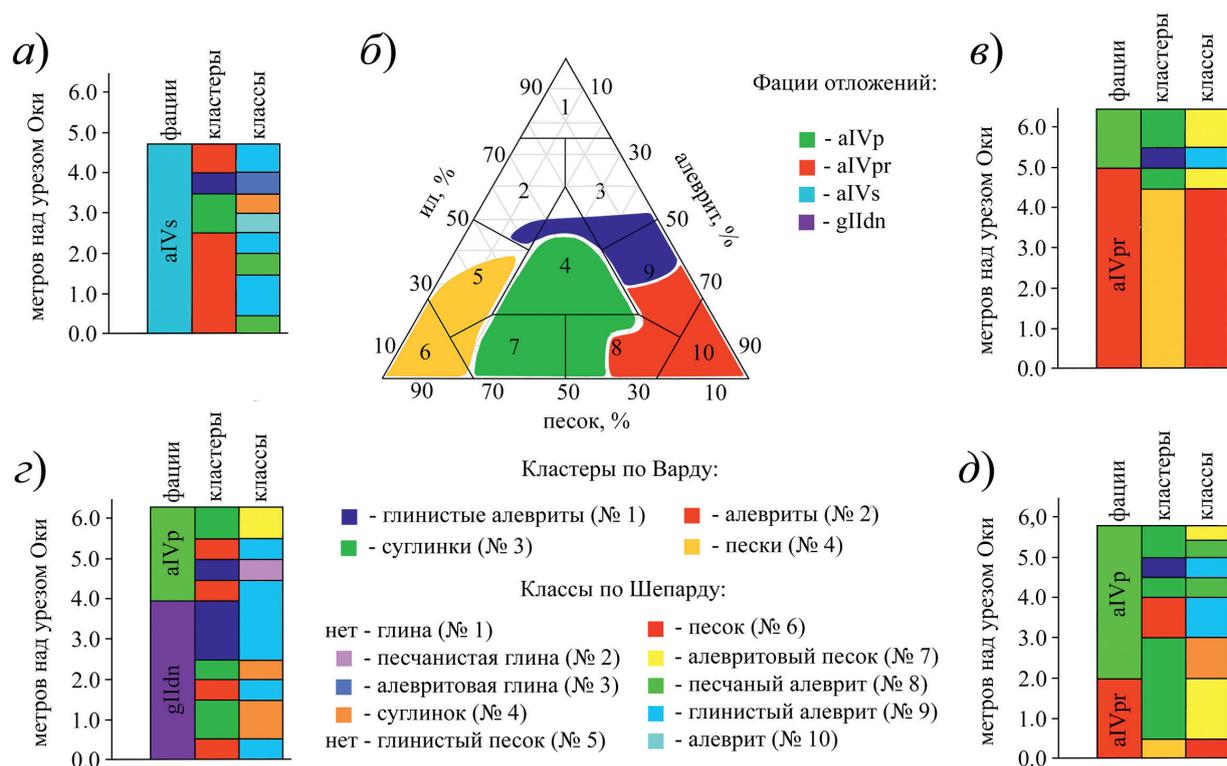


Рис. 8. Гранулотипы эрозионных берегов р. Оки, схемы их стратиграфии и гранулометрических классов отложений: а) гранулотип А, сектор № 12; б) классы на треугольнике Шепарда и кластеры, выделенные методом Варда; в) гранулотип D, сектор № 8; г) гранулотип В, сектор № 14; д) гранулотип С, сектор № 28

Fig. 8. Granulotypes of the Oka River exposed banks, their stratigraphy and granulometric classes of sediments: a) granulotype A, sector no. 12; b) classes on Shepard's ternary diagram and clusters identified by Ward's method; c) granulotype D, sector no. 8; d) granulotype B, sector no. 14; e) granulotype C, sector no. 28

3. Результаты исследования

Средний относительный объем гравийно-галечного материала в геологических телах стационаров невысок (не более 0.5%), однако в отдельных пробах грунтов gII dn с участков «Дядьково» и «Кораблино» он достигает 10–11 %. Тем не менее, согласно ГОСТ 25100-2020 [5], все образцы относятся к мелкообломочным грунтам. Находки крупного и среднего щебня приурочены только к фашии gII dn, экспонированной на пойменных ярах секторов № 13–15 и № 19–22, причем практически весь собранный материал относится к первому баллу окатанности по В.А. Хабакову (угловатые обломки с притертыми

гранями) [3]. Преобладают брусковидная и изометрическая форма щебня известняка, доломита и кремня, пластинчатые и сплюснутые обломки выполняют не более 14 % выборки. Гравий и мелкая галька обнаружены и в отложениях субфации прирусловых валов в секторах № 6, № 8, № 9–11. В шлифах, изготовленных из материала aIVrg, отчетливо видны единичные гравийные зерна наряду с более многочисленными частицами размерностью 0.5–2.0 мм и массовым мелко- и среднепесчаным материалом (рис. 3). Буроватый цемент между псаммитовыми отдельностями представлен пылевато-глинистыми частицами, покрытыми корочками из соединений железа. Среди последних в пойме средней Оки должны быть гётит ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), лепидокрокит ($\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$) и, в меньшей степени, гематит (Fe_2O_3) [19, 21]. Слои из железистых песчаников мощностью до 0.5 м часто обрываются уступом полустационара «Костино», особенно на секторах № 6–8, на остальных учетных площадках подобные горизонты не зафиксированы.

Опыт более ранних работ [14, 19, 21, 29] показывает, что доля минерального компонента в педонах окской поймы составляет не менее 90%, а аллювиальные отложения (за исключением старичных осадков) содержат следовые количества углерода. Как правило, пойменные почвы и подстилающие их породы отождествляются с органоминеральными либо минеральными грунтами согласно ГОСТ 25100-2020. Тем не менее по стратиграфо-генетическим горизонтам запасы углерода могут быть распределены неравномерно. Так, в грунтах, выполняющих погребенные почвы, содержание органического вещества может достигать 1–2 % [16]. Неоднородная стратиграфия полустационаров находит отражение в усредненных кумулятивных кривых гранулометрического состава (рис. 4). Персентиль 50 %-ной обеспеченности для участка «Костино» соответствует мелкому песку (200 мкм), на остальных площадках – фракциям алевритов. Пологая, почти линейная форма графика осадков с площадки «Костино» резко отличается от кривых, близких к логарифмическим (площадки «Заокское» и «Дядьково») и логистической (площадка «Кораблино»).

Отметим, что на полустационарах «Дядьково» и «Кораблино» главные персентили обеспеченности попадают на одинаковые или смежные фракции (25 % – 6–8 мкм, 50 % – 30–53 мкм, 75 % – 95–123 мкм), а максимумы кривых не превышают порог, равный 0.3 мм. В среднем по квартильному размаху наиболее тяжелый гранулометрический состав характерен для отложений gIIdn (размах 5–130 мкм) и, особенно, для aIVs (3–92 мкм). Только осадки ископаемых прирусловых валов и приречной поймы имеют 50 %-ную обеспеченность диаметра частиц во фракции среднего песка (255 мкм) при малой доле алевритов. Однако и пойменную фацию аллювия нельзя признать состоящей лишь из пылевато-глинистого материала (50 %-ная обеспеченность соответствует межфракционной границе 60 мкм). Литологическое обособление собственно пойменных и смешанных пойменно-русловых толщ оправдано более чем двукратными различиями диаметра частиц из верхнего квартиля кривой. Интервал 75–95 %-ной обеспеченности для aIVrg приходится на 325–450 мкм, а для aIVp – на 118–225 мкм.

4. Обсуждение полученных результатов

По стратиграфии и содержанию классов мелкообломочных пород на учетных площадках можно выделить следующие гранулотипы секторов: ложбинный (преобладание тяжелых грунтов aIVs в теле массива), тип наложенной поймы и классический двучленный тип (осадки aIVp залегают на aIVrg) (рис. 8). К первой разновидности (гранулотип А) относятся сектора № 12, 16, 17, 23 и 24, наложенная пойма (гранулотип В) вскрывается на отрезках

№ 13–15 и № 19–22, ко всем остальным секторам приурочена двучленная структура (рис. 2). Эталоны А и В занимают соответственно 17.8 % и 25.0 % фронтов размыва полустационаров. Двучленный и ложбинный гранулотипы рутинны для литологии перстративных отложений в днищах долин крупных водотоков, подобных р. Оке, являясь следствием последовательного развития излучин с чередованием грив и ложбин на создаваемой в ходе данного процесса территории [4, 15, 20, 33]. Отрицательные и положительные формы мезорельефа по-разному откликаются на паводковый размыв. Например, выемки чаще формируются, препарируя именно гривы. Эта закономерность, по нашим ежегодным наблюдениям, проявляется на секторах № 1–8. Описана низкая по сравнению со скрытослоистыми отложениями аIVр устойчивость осадков субфаций приречной поймы и наложенных прирусловых валов не только к флювиальной переработке, но и к склоновым и суффозионным рельефообразующим процессам [6, 20, 27, 32, 49]. Гидродинамика паводковой волны на сегментно-гривистых генерациях рельефа также управляется пространственными сопряжениями ложбин и грив – течения по ложбинам от основного русла на пойму и слив через них осветленного потока на спаде половодья достаточно универсальны на гривистых поймах [8, 13, 31, 33].

Верификация гранулотипа двучленного берега, сложенного аллювиальными породами, зависит от соотношения осадков аIVр и аIVрг. По нашим данным, такой берег имеет высоту 6.1 м над урезом, в среднем 43 % площади откоса выполнено супесями и песками пойменно-руслового генезиса. Однако с учетом того, что усредненные кривые гранулометрического состава двух фаций резко отличаются, высокие берега априори не могут быть объединены в общий гранулотип. В частности, на отрезках № 10 и № 18 мощность пойменной фации аллювия достигает 4.0–5.0 м, в то время как на полустационаре «Костино» обычная мощность аIVр составляет 1.5–2.0 м. С морфогенетических позиций оправдано выделение двух гранулотипов геологической структуры берегов, косвенно связанных с возрастом рельефа. Их можно соотнести с древней (гранулотип С) и молодой (гранулотип D) поймами (рис. 8).

Геоархеологические и палеогеографические исследования в долине р. Оки в ее среднем течении [16, 29] свидетельствуют о возможности формирования мощных пакетов пойменных суглинков. Это происходит, если за последние 8–12 тысяч лет рельеф не подвергался русловой переработке. В Дединовском, Рязанском и Спасском расширениях днища окской долины подобные древние участки с практически сnivelированным рельефом занимают большие площади [10, 21], что связано с устойчивым депонированием взвешенных наносов при распластывании половодного потока.

Значительный объем тонкодисперсного минерального материала с примесью органического вещества (на русловом створе в г. Калуга – около 1 млн. т/год [30]) поступает в пойму р. Оки с водосборов верхней части ее бассейна. Между тем, на участке окской поймы между устьями р. Москвы и Мокши встречаются и активно смещающиеся меандры, подмывающие берега на несколько метров в год [20]. Отложения, выполняющие их фронты размыва, сложены породами легкого гранулометрического состава: по причине сравнительного молодого геологического возраста подобных участков пойменная фация на них слабообразована. Обособленные, в зависимости от преобладания аIVр или аIVрг, две разновидности высоких эрозионных берегов показаны на примере секторов № 28 (гранулотип С) и № 8 (гранулотип D). Средний объем грунтов пойменной фации аллювия в первом случае составляет 34 %, а на откосах IV типа – 69 % (табл.). Распространение их примерно одинаковое: до 25.0 % площади берегов на полустационарах можно соотнести с молодой, а 28.5 % – с древней двучленной поймой.

Номенклатура гранулометрического состава фаций на эталонах заимствована из треугольника Шепарда. В отличие от простых методов кластеризации, данная схема лучше различает осадки aIVs, aIVp и gIIIn. Группировка проб грунта на ней осуществляется по нескольким ближайшим соседям, что снижает риск недообучения модели. Показательно, что алгоритм, совершив необходимое количество итераций и достигнув уровня $k = 3$, поддерживает неизменно высокий уровень точности вплоть до $k = 6$. Причиной устойчивости качества оценки является пропорциональность треугольника и, как следствие, простота распознавания правильных контуров группы объектов в окрестностях выбранной точки. В схематических разрезах каждого берега-эталона классы схемы Шепарда дублируются результатами иерархической кластеризации, при этом очевидна положительная роль небольшого количества групп треугольника (рис. 8). Пески четко отождествляются с классами № 5 и 6, алевриты – с классами № 8–10, суглинки – № 4, 7 и 8 (визуализация выполнена в MatLab 8.1). Верхняя часть фигуры глинисто-алевритового кластера скошена на уровне содержания ила около 50 % (классы № 3 и № 9). Сложены коллоидами более чем наполовину, например, тяжелые грунты морского (крымский кил) или субтропического континентального происхождения (скифские глины, украинский пестроцвет) [2, 3]. В бореальных континентальных осадках подобное обогащение тонкодисперсным материалом обнаруживается редко.

Табл. Характерные гранулотипы пойменных массивов и классификация выполняющих их отложений
Table. Characteristic granulotypes of the floodplain massifs and their sediment classification

Гранулотип	Доля в структуре берегов, %	Средняя высота берега, м	Доля фаций, %	Кластеры по Варду	Классы по Шепарду
A	17.8	4.8	14 (aIVp) 86 (aIVs)	1, 2, 3	4, 8, 9
B	25.0	6.2	38 (aIVp) 62 (gIIIn)	1, 2, 3	4, 9
C	28.5	5.8	69 (aIVp) 4 (aIVs) 27 (aIVpr)	1, 2, 3	4, 6, 8, 9
D	25.0	6.3	34 (aIVp) 6 (aIVs) 60 (aIVpr)	3, 4	6, 7, 8

Схема Рухина, несмотря на низкий процент ошибочного определения класса, излишне фрагментирует пространство объектов. Избыточность количества полигонов данного треугольника отмечалась ранее в обобщающей сводке [3]. Некоторые классы (например, глинистые алевриты и глинистые пески) занимают настолько малое место на геометрической фигуре, что алгоритм обучения вынужден присваивать среднее значение лишь по одному ближайшему объекту (обучение отсутствует). Выделение гомогенных групп грунтов по треугольникам Ферре и Охотина осложнено смещением барицентров в выполняющих их полигонах неправильной формы. Подмножества, обособляемые по гранулометрическому составу, должны строго заполнять эти фигуры, что наблюдается лишь отчасти. Неудовлетворительные результаты по метрикам P_{misgo} и P_{masgo} , равно как и высокая кросс-валидационная ошибка, во втором случае являются следствием слишком узких полигонов для песчано-суглинистых классов № 1–9.

Внутренняя геометрия схемы Пустовалова относительно симметрична. Ожидается, что ее классификационный потенциал расширится при увеличении выборки в ходе дальнейших исследований литологии берегов р. Оки. Кроме того, хлидолиты, обнаруженные в aIVp, маркируют особые седиментационные обстановки затопляемой высокой поймы, на поверхность которой когда-то поступали руслообразующие наносы и формировали осадок при коагуляции коллоидов. Ранее было показано [10, 28], что алевритовые частицы играют значительную роль в составе современного наилка на аккумулятивных берегах р. Оки, поскольку в ее бассейне широко распространены лессовидные породы – источники взвешенных наносов. Тем не менее около 10 % проб, полученных из эрозионных берегов, относится именно к хлидолитам, не наследующим по своему составу геолого-геоморфологической основе окских водосборов.

Заключение об алевритовом и суглинистом составе грунтов aIVp справедливо, в первую очередь, в региональном масштабе. Так, состав субфации прирусловых валов в приустьевой части долины р. Миссисипи описывается аналогичными усредненными кривыми [3], а пойменные осадки в верхнем течении содержат до 50 % песка и гравия [35]. До пересечения р. Хуанхэ плато Ордос обвалование ее поймы на 30–50 % осуществляется за счет аккумуляции псаммитовых частиц [32], но в среднем и нижнем течении в составе рельефа абсолютно доминируют алевриты [8]. В районе нашего исследования соотношение в твердом стоке р. Оки взвешенных и влекомых наносов составляет около 6/1 [30], сохраняя ограниченные возможности обвалования русла песками и супесями. Сопряжения наложенных прирусловых валов и толщ скрытослоистой субфации aIVp на выровненных участках создают в расширениях окской поймы мозаику мезорельефа, осложняющую прогнозы русловых деформаций и их геоэкологических последствий.

Преобладающими породами в составе грунтов aIVs согласно схеме Шепарда являются глинистые и песчаные алевриты, реже – суглинки. Как и в долинах большинства крупных рек Центральной и Восточной Европы, заполнение старичных ложбин окской поймы происходит за сотни и первые тысячи лет путем осаднения в стоячих или медленно текущих суспензиях тонкодисперсного материала [21, 26, 29]. В разных источниках он, зачастую произвольно, обозначается как илы [11, 21, 34, 36], глины [1, 3], алевриты [8, 10] или тяжелые суглинки [19, 24]. На одной части секторов полустационаров с ложбинным типом стратиграфии фация aIVs представлена сочетанием классов суглинков, песчаных и глинистых алевритов (рис. 8). Это позволяет предполагать значительную роль наносов бассейнового генезиса в ее составе. Напротив, старичные линзы секторов № 16 и № 23 практически полностью сложены глинистыми алевритами. По всей видимости, основным источником твердофазного материала для них были фронты размыва на тех же самых излучинах р. Оки, поскольку в близлежащих осадках gIIdn доля глины также достигает 30–50 %.

Тяжелый гранулометрический состав, коричнево-серый цвет, малое содержание крупнообломочного материала, преимущественно местного происхождения, сближают ледниковые отложения на полустационарах с пачками базальной (донной) морены на ряде разрезов центра Русской равнины. На Сатинском полигоне МГУ имени М.В. Ломоносова (разрез Боровск, верхняя Ока) [7] вскрыт сходный слой gIIdn, кластический материал которого свидетельствует о потоковом движении ледяной массы от Новоземельско-Уральского центра сноса материала. В рыхлых шлейфах осыпей на учетных площадках «Кораблино» и «Дядьково» определить исходную ориентировку валунов, галек и гравия невозможно, но в стенках опорных шурфов брусковидные обломки также имеют положение главной оси преимуще-

ственно с севера на юг или с северо-востока на юго-запад. Плотное монолитное сложение, диагностированное нами для грунтов gII_{dn}, характерно и для базальной «донской» морены в долинах р. Савалы, Вороны и Ближней Сурины (Воронежская область), сложенной тяжелыми суглинками и легкими глинами [39]. Предполагается, что берега гранулотипа В должны быть наиболее редкими в среднем течении р. Оки, несмотря на sporadическую дислокацию в рязанской части Мещерской низменности скважин, проходящих одну или две морены [11].

Своеобразное строение наложенной поймы оказывает влияние как на общую устойчивость окского русла, так и на сезонную морфолитодинамику его берегов. В течение всего года отложения gII_{dn} отличаются повышенной степенью влагонасыщения [37], а монолитность и уплотненность (плотность скелета грунта достигает 1.60–1.75 г/см³) делает их хорошим водоупором. При наклонном залегании пластов, как, например, на секторе № 15, силы трения на границе фациального раздела имеют минимальные значения. В таких условиях не исключено развитие оползней, в том числе, подводных. Проводимый ежегодный мониторинг состояния рельефа многократно фиксировал отседание блоков aIV_p после паводка, которое в последующие месяцы сменялось осыпанием [47]. Летом, из-за большого содержания глины, значимым минералогическим компонентом которой должен быть разбухающий смектит [19], рельефообразующие процессы в «ледниковой» части откоса редуцированы. Крупные обрушения его надводного основания и подводного склона инспирированы непосредственным размывом в половодье. Для берегов-эталонных С и D характерны обсохшие в теплый период года откосы, переработка которых склоновыми, антропогенными и биогенными процессами идет постоянно. В то же время, бесструктурные осадки gII_{dn} на элементарных уклонах крутизной 40–60° интенсивно размываются летними ливнями. Следы таких размывов являются эрозионные борозды (риллы [8]) на поверхности коричнево-серой ледниковой толщи, которая никогда не бывает задернованной.

Карнизы из почвенно-растительного слоя, нависающие над осыпавшимися и отсевшими блоками aIV_p и aIV_{rg}, подчеркивают повышенную противэрозионную устойчивость приповерхностных дерновых горизонтов [48]. Периодическое возобновление зонального почвообразования на протяжении голоцена привело к формированию мощных погребенных педолитокомплексов, частично слагающих берега-эталонные В и С [16]. Классификация Шепарда, в том числе по причине больших интервалов в колонках отбора проб, нечетко обособляет палеопочвы. Как правило, положение их гумусово-аккумулятивных и текстурно-иллювиальных горизонтов в разрезах совпадает с утяжелением гранулометрического состава отложений. Чаще всего они представлены глинистыми алевритами (класс № 9 по Шепарду). Не зафиксировано ни одной палеопочвы, сформировавшейся на песчано-супесчаных отложениях, соотнесенных с классами № 5 и 6 или группированных в кластер № 4 по методу Варда. Роль трансформации материнских пород древним почвообразованием в их противэрозионной устойчивости в настоящее время не определена [6, 10, 18, 20, 29, 31, 34]. Предполагается, что она оказывает влияние, главным образом, на поперечный профиль откоса, его осложнение эфемерным микрорельефом, а также на преобладающие механизмы эрозии в теплое время года. Разрушение берегов в половодья и, как следствие, потери ценного земельного фонда зрелой (термин Е.В. Шанцера [40]) поймы управляются более универсальными гидролого-геоморфологическими закономерностями.

Инвентаризация гранулометрического состава русловых склонов на полустационарах формализует их геологическую структуру до простых кодов: «Костино» –

D8 (или DDDDDDDDD), «Заокское» – A1C3, «Дядьково» – A2B3C1, «Кораблино» – A2B4C4. Литология откосов сводится к категориальной переменной, дискриминирующей количественные критерии морфологии берегов (высоту, крутизну, продольную и плановую кривизну рельефа) и русла (ширину, глубину, уклон) в контексте достоверности их влияния на динамику боковой эрозии. Соотношение фаций в рамках каждого гранулотипа (в будущем возможен переход к литотипам) и высота берега будут уточняться при увеличении пространственного охвата исследований. Не исключено, что оценки этих параметров станут интервальными, что наиболее вероятно в отношении гранулотипа А из-за неодинакового возраста старичных ложбин и, как следствие, различной их глубины. В первую очередь, предложенный подход определения значимости геолого-геоморфологических факторов эрозии целесообразно применить на других фронтах размыва окских меандров – основных зонах ежегодных потерь земельных угодий.

Заключение

Благодаря геодезической съемке берегов русла р. Оки и полевым работам установлены главные черты строения неодинаковых по морфологии пойменных генераций в пределах геоморфологических полустационаров. На протяжении 1.4 км эрозионных берегов водотока голоценовые аллювиальные осадки слагают 84 % руслового склона, а оставшаяся часть откосов вскрывает ледниковые отложения днепровского возраста. С ними связаны находки крупного кластического материала, большая часть которого представлена изометрическим и брусковидным щебнем кремня и местных карбонатов. Морена, предположительно донная, сохранилась от руслового размыва на 25 % общей площади учетных площадок, частично выполняя сложные геологические тела наложенной поймы. Гравий, дресва и щебень составляют не более 5 % объема древних пойменных массивов, однако выражена их маркирующая роль для локального геоморфологического районирования окской поймы.

Средний диаметр руслообразующих частиц (D_{50}) на надводных частях берегов Оки составляет 0.09 мм. Поскольку отечественная нормативная документация идентифицирует изъятые пробы отложений, преимущественно как минеральные мелкообломочные грунты, то предложена их классификация на основе метода k -ближайших соседей с учетом соотношения песка, алеврита и глины. Гранулометрический треугольник Шепарда выбран в качестве оптимальной схемы классификации, так как она пропорциональна, четко обосновывает группировку проб с использованием популярных литологических терминов и демонстрирует хорошую сходимость с результатами традиционного кластерного анализа.

Неопределенная характеристика окских пойменных отложений как «суглинистых» уточнена при совместном применении иерархической, центроидной и машинной кластеризации. Выделенные 4–5 групп образцов определяют ледниковые плейстоценовые отложения в основном как глинистые алевриты. По выбранному треугольнику рельеф осадков голоценового возраста выполнен пойменным аллювием суглинистого и алевритового состава, на молодых генерациях рельефа он подстилается песками, глинистыми песками и песчаными алевритами. Установлены отличия в механическом составе старичных линз на полустационарах. Предполагается контроль их литологии источниками наносов бассейнового и руслового происхождения. Все четыре предложенные гранулотипа берегов р. Оки соответствуют высокой пойме. Три из берегов-эталонов представляют склоны пойменных генераций голоценового возраста, еще один – стратиграфию наложенной поймы. Геологическое строение, структурно-морфологические параметры берегов-эталонов и приуроченность их к опреде-

ленным морфодинамическим позициям русла нуждаются в проверке на более обширном материале. Дальнейшие исследования предполагают использование алгоритма машинной классификации без учителя на новых литологических записях как для отложений учетных площадок, так и на прочих фрагментах эрозионных берегов, которые не рассматривались в настоящем исследовании.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Романовский С.И. Физическая седиментология. Л.: Недра, 1988. 240 с.
2. Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Е.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Грунтоведение. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с.
3. Фролов В.Т. Литология. Книга 2. М.: Изд-во МГУ, 1992. 430 с.
4. Miall A. Fluvial Depositional Systems. Ser.: Springer Geology. Cham: Springer, 2014. ix, 316 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00666-6>.
5. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 41 с.
6. Коробкин В.И., Передельский Л.В. Инженерная геология и охрана окружающей среды. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2013. 348 с.
7. Фаустов С.С., Карпунин С.С., Судакова Н.Г. Влияние условий седиментации морен на ориентировку векторов остаточной намагниченности // Вестн. Московского университета. Серия 5. География. 2010. № 1. С. 35–43.
8. Эрозионно-руслевые системы / под ред. Р.С. Чалова, В.Н. Голосова, А.Ю. Сидорчука. М.: ИНФРА-М, 2017. 702 с.
9. Woodward J., Foster I. Erosion and suspended sediment transfer in river catchments: Environmental controls, processes and problems // Geography. 1997. V. 82, No 44. P. 353–376. <https://doi.org/10.1080/20436564.1997.12452621>.
10. Кривцов В.А. Рельеф Рязанской области (региональный геоморфологический анализ). Рязань: Изд-во РГПУ, 1998. 195 с.
11. Кривцов В.А., Воробьев А.Ю., Комаров М.М. Река Ока и некоторые особенности развития рельефа южной части Мещерской низменности в четвертичное время // Вестник Ряз. гос. ун-та. 2016. №2/51. С. 181–197.
12. Симонов Ю.Г. Геоморфология. Методология фундаментальных исследований. СПб.: Питер, 2005. 427 с.
13. Барышников Н.Б. Проблемы морфологии, гидрологии и гидравлики пойм. СПб.: РГГМУ, 2012. 426 с.
14. Зайдельман Ф.Р., Беличенко М.В., Бибин А.С. Деградация и восстановление почв поймы р. Москва за последние 50 лет // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1377–1386. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13110105>.
15. Das V.K., Roy S., Barman K., Chaudhuri S., Debnath K. Study of clay–sand network structures and its effect on river bank erosion: An experimental approach // Environ. Earth Sci. 2019. V. 78, No 20. Art. 591. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8613-5>.
16. 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. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-4-3-16>.

17. Баровский Н.А. Гидролого-морфодинамический анализ свободно меандрирующих русел на разных стадиях развития // Геоморфология. 2005. № 4. С. 54–63. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2005-4-54-63>.
18. Беркович К.М. Руслу рек и деятельность человека. М.: Принтков, 2020. 146 с.
19. Муромцев Н.А., Мажайский Ю.А., Семенов Н.А., Лыткин И.И., Шуравилин А.В., Томин Ю.А. Почвы долин рек Оки и Угры и их продуктивность. Рязань: РГАТУ им. проф. П.А. Костычева, 2011. 203 с.
20. Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит // Труды Института геолог. наук. Геологическая серия (№ 55). 1951. Вып. 135. 271 с.
21. Лазаренко А.А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны, Оки) // Труды Геол. инст. АН СССР. 1964. Вып. 120. 237 с.
22. Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Лепихин А.П. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 37–46. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-1-3>.
23. Рекомендации по оценке и прогнозу размыва берегов равнинных рек и водохранилищ для строительства ПНИИИС Госстроя СССР. М.: Стройиздат, 1987. 200 с.
24. Солнцев Н.А. Учение о ландшафте: избранные труды. М.: Изд-во МГУ, 2001. 383 с.
25. Barman K., Roy S., Das V.K., Debnath K. Effect of clay fraction on turbulence characteristics of flow near an eroded bank // J. Hydrol. 2019. V. 571. P. 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.061>.
26. Lagasse P.F., Zewenbergen L.W., Spitz W.J., Thorne C.R. Methodology for Predicting Channel Migration. Washington, DC: Transp. Res. Board, 2004. 214 p.
27. Karmaker T., Dutta S. Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India // Hydrol. Processes. 2011. V. 25, No 1. P. 104–111. <https://doi.org/10.1002/hyp.7826>.
28. Воробьев А.Ю., Кривцов В.А., Кадыров А.С. Современная динамика накопления и состав аллювия прирусловой поймы реки Оки // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2021. Т. 163, кн. 4. С. 603–625. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.4.603-625>.
29. Кривцов В.А., Воробьев А.Ю., Водорезов А.В., Зазовская Э.П. Особенности формирования поймы реки Оки в ее среднем течении (на примере Спасского расширения) // Геоморфология. 2020. № 3. С. 56–71. <https://doi.org/10.31857/S0435428120030050>.
30. Беляков А.А., Беркович К.М. Река Ока: проблемы и перспективы реконструкции // Эрозионные и русловые процессы. Вып. 4. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 251–273.
31. Luppi L., Rinaldi M., Teruggi L.B., Darby S.E., Nardi L. Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: A case study along the Cecina River (central Italy) // Earth Surf. Processes. Landforms 2009. V. 34, No 4. P. 530–546. <https://doi.org/10.1002/esp.1754>.
32. Shu A., Li F., Liu H., Duan G., Zhou X. Characteristics of particle size distributions for the collapsed riverbank along the desert reach of the upper Yellow River // Int. J. Sediment Res. 2016. V. 31, No 4. P. 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.03.002>.
33. Zong Q., Xia J., Zhou M., Deng S., Zhang Y. Modelling of the retreat process of composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM // Hydrol. Process. 2017. V. 31, No 26. P. 4669–4681. <https://doi.org/10.1002/hyp.11387>.
34. 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. 75–83. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2009-2-75-83>.
35. Remo J.W.F., Heine R.A., Ickes B.S. Particle size distribution of main-channel-bed sediments along the upper Mississippi River, USA // Geomorphology. 2016. V. 264. P. 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.012>.

36. Еленевский Р.А. Окские луга. М.: Новая деревня, 1924. 64 с.
37. Подземная охранная зона исторической территории Рязанского Кремля / под ред. Романовой Е.И., Купцова А.Г. Рязань: Стиль, 1995. 138 с.
38. Матлахова Е.Ю., Украинцев В.Ю. Строение поймы реки Мокши как ключ к позднеплейстоценовой истории развития долины // Геоморфология. 2022. Т. 53, № 5. С. 127–133. <https://doi.org/10.31857/S0435428122050108>.
39. Hamshaw S.D., Bryce T., Rizzo D.M., O'Neil-Dunne J., Frolik J., Dewoolkar M.M. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning // River Res. Applic. 2017. V. 33, No 8. P. 1354–1367. <https://doi.org/10.1002/rra.3183>.
40. Глушков Б.В. Геология отложений ледникового комплекса донского ледникового языка // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2011. № 2. С. 40–48.
41. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
42. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.
43. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. М.: ФОРУМ, 2008. 464 с.
44. Fahad A., Alshatri N., Tari Z., Alamri A., Khalil I., Zomaya A.Y., Foufou S., Bouras A. A survey of clustering algorithms for big data: Taxonomy and empirical analysis // IEEE Trans. Emerg. Top. Comput. 2014. V. 2, No 3. P. 267–279. <https://doi.org/10.1109/TETC.2014.2330519>.
45. Xia J., Zhang J., Wang Y., Han L., Yan H. WC-KNNG-PC: Watershed clustering based on *k*-nearest-neighbor graph and Pauta Criterion // Pattern Recognit. 2022. V. 121. Art. 108177. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108177>.
46. Fox G.A., Heeren D.M., Miller R.B., Mittelstet A.R., Storm D.E. Flow and transport experiments for a streambank seep originating from a preferential flow pathway // J. Hydrol. 2011. V. 403, Nos 3–4. P. 360–366. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.014>.
47. Воробьев А.Ю., Кадыров А.С., Локтеев Д.С., Бургов Е.В., Балобина А.А. Расчет сезонной эрозии на береговых откосах реки Оки с помощью геодезических методов // Известия Русского географического общества. 2023. Т. 155, № 2. С. 25–43. <https://doi.org/10.31857/S0869607123020088>.
48. Теории и методы физики почв: коллективная монография / под ред. Е.В. Шеина, Л.О. Карпачевского. М: Гриф и К, 2007. 616 с.

References

1. Romanovskii S.I. *Fizicheskaya sedimentologiya* [Physical Sedimentology]. Leningrad, Nedra, 1988. 240 p. (In Russian)
2. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskii E.A., Golodkovskaya E.A., Vasil'chuk Y.K., Ziangirov R.S. *Gruntovedenie* [Soil Science]. Moscow, Izd. MGU, 2005. 1024 p. (In Russian)
3. Frolov V.T. *Litologiya* [Lithology]. Book 2. Moscow, Izd. MGU, 1992. 430 p. (In Russian)
4. Miall A. *Fluvial Depositional Systems*. Ser.: Springer Geology. Cham, Springer, 2014. ix, 316 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00666-6>.
5. State Standard 25100-2020. Soils. Classification. Moscow, Standartinform, 2020. 41 p. (In Russian)
6. Korobkin V.I., Peredel'skii L.V. *Inzhenernaya geologiya i okhrana okruzhayushchei sredy* [Engineering Geology and Environmental Protection]. Rostov-on-Don, Izd. Rostov. Univ., 2013. 348 p. (In Russian)
7. Faustov S.S., Karpukhin S.S., Sudakova N.G. Influence of moraine sedimentation conditions on the remanence direction. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 5. Geogr.*, 2010, no. 1, pp. 35–43. (In Russian)

8. Chalov R.S., Golosov V.N., Sidorchuk A.Yu. (Eds.) *Eroziionno-ruslovye sistemy* [Catchment Erosion-Fluvial Systems]. Moscow, INFRA-M, 2017. 702 p. (In Russian)
9. Woodward J., Foster I. Erosion and suspended sediment transfer in river catchments: Environmental controls, processes and problems. *Geography*, 1997, vol. 82, no. 44, pp. 353–376. <https://doi.org/10.1080/20436564.1997.12452621>.
10. Krivtsov V.A. *Rel'ef Ryazanskoi oblasti (regional'nyi geomorfologicheskii analiz)* [Relief of the Ryazan Region (Regional Geomorphologic Analysis)]. Ryazan, Izd. RGPU, 1998. 195 p. (In Russian)
11. Krivtsov V.A., Vorobyev A.Yu., Komarov M.M. The Oka River and the evolution of relief in the southern part of the Meschera Lowland in the quaternary period. *Vestn. Ryazan. Gos. Univ.*, 2016, no. 2/51, pp. 181–197. (In Russian)
12. Simonov Yu.G. *Geomorfologiya. Metodologiya fundamental'nykh issledovaniy* [Geomorphology. Fundamental Research Methodology]. St. Petersburg, Piter, 2005. 427 p. (In Russian)
13. Baryshnikov N.B. *Problemy morfologii, gidrologii i gidravliki poim* [Problems of Morphology, Hydrology, and Hydraulics of Floodplains]. St. Petersburg, RGGMU, 2012. 426 p. (In Russian)
14. Zaidelman F.R., Belichenko M.V., Bibin A.S. Degradation and restoration of soils in the Moscow River floodplain for the last fifty years. *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 11, pp. 1097–1106. <https://doi.org/10.1134/S1064229313110070>.
15. Das V.K., Roy S., Barman K., Chaudhuri S., Debnath K. Study of clay–sand network structures and its effect on river bank erosion: An experimental approach. *Environ. Earth Sci.*, 2019, vol. 78, no. 20, art. 591. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8613-5>.
16. Glasko M.P., Alexandrovskiy A.L. Interaction of alluvial and soil formation processes at different stages of the flood plains development during the Holocene (the rivers of the central part of the East European Plain as an example). *Geomorfologiya*, 2014, no. 4, pp. 3–17. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-4-3-16>. (In Russian)
17. Barovsky N.A. Hydrologic-morphodynamic analysis of free-meandering channels at different stages of their evolution. *Geomorfologiya*, 2005, no. 4, pp. 54–63. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2005-4-54-63>. (In Russian)
18. Berkovich K.M. *Rusla rek i deyatel'nost' cheloveka* [River Channels and Human Activity]. Moscow, Printkov, 2020. 146 p. (In Russian)
19. Muromtsev N.A., Mazhaiskii Yu.A., Semenov N.A., Lytkin I.I., Shuravilin A.V., Tomin Yu.A. *Pochvy dolin rek Oki i Ugry i ikh produktivnost'* [Soils of the Oka and Ugra Valleys and Their Productivity]. Ryazan, RGATU im. prof. P.A. Kostycheva, 2011. 203 p. (In Russian)
20. Shantser E.V. Alluvium of lowland rivers in the temperate zone and its importance for understanding the structure and development of alluvial formations. *Tr. Inst. Geol. Nauk. Geol. Ser. (no. 55)*, 1951, vol. 135. 271 p. (In Russian)
21. Lazarenko A.A. Alluvium lithology of lowland rivers in the humid zone (a case study of the Dnieper, Desna, and Oka). *Tr. Geol. Inst. Akad. Nauk SSSR*, 1964, no. 120. 237 p. (In Russian)
22. Luchnikov A.I., Lyakhin Y.S., Lepikhin A.P. Using unmanned aerial vehicles for assessing the condition of shorelines in surface water bodies. *Vodn. Khoz. Ross.: Probl., Tekhnol., Upr.*, 2018, no. 1, pp. 37–46. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-1-3>. (In Russian)
23. *Rekomendatsii po otsenke i prognozu razmyva beregov ravninnykh rek i vodokhranilishch dlya stroitel'stva PNIIS Gosstroya SSSR* [Recommendations on Assessing and Forecasting the Erosion of Lowland River and Reservoir Banks for Construction of the Production and Research Institute for Engineering Surveys in Construction, State Committee for Construction in the Soviet Union]. Moscow, Stroiizdat, 1987. 200 p. (In Russian)
24. Solntsev N.A. *Uchenie o landshafte: izbrannye trudy* [Landscape Studies: Selected Works]. Moscow, Izd. MGU, 2001. 383 p. (In Russian)

25. Barman K., Roy S., Das V.K., Debnath K. Effect of clay fraction on turbulence characteristics of flow near an eroded bank. *J. Hydrol.*, 2019, vol. 571, pp. 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.061>.
26. Lagasse P.F., Zewenbergen L.W., Spitz W.J., Thorne C.R. *Methodology for Predicting Channel Migration*. Washington, DC, Transp. Res. Board, 2004. 214 p.
27. Karmaker T., Dutta S. Erodibility of fine soil from the composite river bank of Brahmaputra in India. *Hydrol. Processes*, 2011, vol. 25, no. 1, pp. 104–111. <https://doi.org/10.1002/hyp.7826>.
28. Vorobyov A. Yu., Krivtsov V.A., Kadyrov A.S. Current dynamics of accumulation and composition of alluvium in the near-channel floodplain of the Oka River (Russia). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 4, pp. 603–625. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2021.4.603-625>. (In Russian)
29. Krivtsov V.A., Vorobyov A. Yu., Vodoretsov A.V., Zazovskaya E.P. Features of the floodplain formation of the Oka River in its middle reaches: The case study of the “Spasskoe” local widening. *Geomorfologiya*, 2020, no. 3, pp. 56–71. <https://doi.org/10.31857/S0435428120030050>. (In Russian)
30. Belyakov A.A., Berkovich K.M. The Oka River: Problems and prospects for reconstruction. In: *Eroziionnye i ruslovyie protsessy* [Erosion and Channel Processes]. Vol. 4. Moscow, Izd. MGU, 2005. pp. 251–273. (In Russian)
31. Luppi L., Rinaldi M., Teruggi L.B., Darby S.E., Nardi L. Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: A case study along the Cecina River (central Italy). *Earth Surf. Processes Landforms*, 2009, vol. 34, no. 4, pp. 530–546. <https://doi.org/10.1002/esp.1754>.
32. Shu A., Li F., Liu H., Duan G., Zhou X. Characteristics of particle size distributions for the collapsed riverbank along the desert reach of the upper Yellow River. *Int. J. Sediment Res.*, 2016, vol. 31, no. 4, pp. 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.03.002>.
33. Zong Q., Xia J., Zhou M., Deng S., Zhang Y. Modelling of the retreat process of composite riverbank in the Jingjiang Reach using the improved BSTEM. *Hydrol. Processes*, 2017, vol. 31, no. 26, pp. 4669–4681. <https://doi.org/10.1002/hyp.11387>.
34. Smirnova E.A., Lobanov G.V., Bastrakov G.V. The impact of ground hardness on riverbed deformations in the middle reach of the Desna River. *Geomorfologiya*, 2009, no. 2, pp. 75–83. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2009-2-75-83>.
35. Remo J.W.F., Heine R.A., Ickes B.S. Particle size distribution of main-channel-bed sediments along the upper Mississippi River, USA. *Geomorphology*, 2016, vol. 264, pp. 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.012>.
36. Elenevskii P.A. *Okskie luga* [Meadows of the Oka River]. Moscow, Nov. Derevnaya, 1924. 64 p. (In Russian)
37. Romanova E.I., Kuptsov A.G. (Eds.) *Podzemnaya okhrannaya zona istoricheskoi territorii Ryazanskogo Kremlya* [Protected Underground Space of the Ryazan Kremlin Territory]. Ryazan, Stil', 1995. 138 p. (In Russian)
38. Matlakhova E.Yu., Ukraintsev V.Yu. The structure of the Moksha River floodplain as a key to the Late Pleistocene history of the valley development. *Geomorfologiya*, 2022, vol. 53, no. 5, pp. 127–133. <https://doi.org/10.31857/S0435428122050108>. (In Russian)
39. Hamshaw S.D., Bryce T., Rizzo D.M., O'Neil-Dunne J., Frolik J., Dewoolkar M.M. Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning. *River Res. Appl.*, 2017, vol. 33, no. 8, pp. 1354–1367. <https://doi.org/10.1002/rra.3183>.
40. Glushkov B.V. Sedimentasry geology of the Don ice tongue complex. *Vestn. VGU. Ser.: Geol.*, 2011, no. 2, pp. 40–48. (In Russian)
41. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. *Metody issledovaniya fizicheskikh svoistv pochv* [Methods for Studying the Physical Properties of Soils]. Moscow, Agropromizdat, 1986. 416 p. (In Russian)

42. State Standard 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow, Standardinform, 2019. 23 p. (In Russian)
43. Vukolov E.A. *Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsii s ispol'zovaniem paketov STATISTICA i EXCEL* [Fundamentals of Statistical Analysis. Handbook of Statistical Methods and Operations Research Using STATISTICA and EXCEL Packages]. Moscow, FORUM, 2008. 464 p. (In Russian)
44. Fahad A., Alshatri N., Tari Z., Alamri A., Khalil I., Zomaya A.Y., Foufou S., Bouras A. A survey of clustering algorithms for big data: Taxonomy and empirical analysis. *IEEE Trans. Emerg. Top. Comput.*, 2014, vol. 2, no. 3. pp. 267–279. <https://doi.org/10.1109/TETC.2014.2330519>.
45. Xia J., Zhang J., Wang Y., Han L., Yan H. WC-KNNG-PC: Watershed clustering based on *k*-nearest-neighbor graph and Pauta Criterion. *Pattern Recognit.*, 2022, vol. 121, art. 108177. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2021.108177>.
46. Fox G.A., Heeren D.M., Miller R.B., Mittelstet A.R., Storm D.E. Flow and transport experiments for a streambank seep originating from a preferential flow pathway. *J. Hydrol.*, 2011, vol. 403, nos. 3–4, pp. 360–366. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.014>.
47. Vorob'ev A.Ju., Kadyrov A.S., Lokteev D.S., Burgov E.V., Balobina A.A. Calculation of seasonal erosion on the Oka River riverbanks using geodetic modeling. *Izv. Russ. Geogr. O-va.*, 2023, vol. 155, no. 2, pp. 25–43. <https://doi.org/10.31857/S0869607123020088>. (In Russian)
48. Shein E.V., Karpachevskii L.O (Eds.). *Teorii i metody fiziki pochv* [Theories and Methods of Soil Physics]. Moscow, Grif i K, 2007. 616 p. (In Russian)

Информация об авторах

Алексей Юрьевич Воробьев, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, экологии и туризма, Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина

E-mail: a.vorobyov90@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7110-4232>

Александр Сергеевич Кадиров, аспирант, лаборант кафедры географии, экологии и туризма, Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина

E-mail: aliekstrand.kadyrov93@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1416-7898>

Евгений Вадимович Бургов, кандидат биологических наук, начальник группы биотехнических систем КК МБИКС-ПТ лаборатории робототехники, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»; инженер, Лаборатория почвенной зоологии и общей энтомологии, Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова Российской академии наук

E-mail: burgov.ev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3983-5748>

Дмитрий Сергеевич Локтеев, студент Заочного факультета, Московский государственный университет геодезии и картографии

E-mail: lokteev@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0345-0504>

Анна Александровна Балобина, магистрант Института экологии, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы

E-mail: balobina-anna@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0261-7392>

Author Information

Aleksey Y. Vorobyov, Cand. Sci. (Geography), Associate Professor, Department of Geography, Ecology, and Tourism, Ryazan State University named for S. Yesenin

E-mail: a.vorobyov90@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7110-4232>

Aleksandr S. Kadyrov, Postgraduate Student, Assistant, Department of Geography, Ecology, and Tourism, Ryazan State University named for S. Yesenin

E-mail: aliekstrandr.kadyrov93@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1416-7898>

Evgenii V. Burgov, Cand. Sci. (Biology), Head of the Biotechnical KK MBIKS-PT Systems Group of the Robotics Laboratory, National Research Center “Kurchatov Institute”; Engineer, Laboratory of Soil Zoology and General Entomology, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences

E-mail: burgov.ev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3983-5748>

Dmitry S. Lokteev, Student, Correspondence Faculty, Moscow State University of Geodesy and Cartography

E-mail: lokteev@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0345-0504>

Anna A. Balobina, Master’s Student, Institute of Ecology, Peoples’ Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

E-mail: balobina-anna@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0261-7392>

Поступила в редакцию 28.04.2024

Принята к публикации 25.07.2024

Received April 28, 2024

Accepted July 25, 2024