

МЕЖВУЗОВСКИЙ НАУЧНО-КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ ПО
ПРОБЛЕМЕ ЭРОЗИОННЫХ, РУСЛОВЫХ И УСТЬЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

**ЭРОЗИОННЫЕ, РУСЛОВЫЕ И УСТЬЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ
(ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ УНИВЕРСИТЕТОВ)**

Сборник статей по материалам XIII семинара молодых ученых вузов, объединяемых Межвузовским советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов
г. Набережные Челны
25-29 апреля 2022 года

Москва, 2023

УДК 556.537(082)

ББК 26.222я43

Э81

Э81 Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университетов) М.: МГУ. 2023. 144 с.

В сборник вошли статьи, написанные по материалам докладов молодых ученых (студентов старших курсов, магистрантов, аспирантов, научных сотрудников и преподавателей) на XIII семинаре, организованном Межвузовским научно-координационным советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ имени М.В. Ломоносова. Семинар состоялся в г. Набережные Челны а базе Набережночелнинского государственного педагогического университета. Рассчитан на гидрологов, геоморфологов, почвоведов, геоэкологов, специалистов по эрозии почв, овражной эрозии и русловым процессам, водным путям.

Редакционная комиссия:

проф. Р.С. Чалов (председатель МНКС), к.г.н. С.Н. Рулёва (ученый секретарь МНКС), П.П. Головлев (председатель молодежного бюро МНКС), к.г.н. М.М. Иванов, к.г.н. Ковалев С.Н.,
к.п.н. Т.В. Гайфутдинова, д.г.н. А.В. Чернов

Печатается по постановлению Президиума Межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов при МГУ.

Издано на средства научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова

Рецензенты:

*кандидат географических наук В.Р. Беляев,
доктор географических наук Н.Н. Назаров*

21.03.2023 г.

ISBN 978-5-00147-486-9



9 785001 474869 >

© Коллектив авторов. 2023

© Географический факультет МГУ. 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
<i>Ж.А. Буряк</i> Проблемы землепользования в водоохраных зонах рек Крыма	6
<i>О.Е. Ватина, В.М. Подковырина, О.Н. Пашкин, А.И. Фомина, О.Н. Читури-</i> <i>на</i> Динамика протяженности русловой сети элементарных водотоков на территории водосборного бассейна реки Бирля Республики Татарстан	10
<i>А.М. Гафуров</i> Картографирование струйчатой эрозии Среднего Поволжья с использованием глубоких нейронных сетей	14
<i>Г.Б. Голубцов</i> Морфология русла и рассредоточение стока среди островов сложных параллельно-рукавных разветвлений нижней Лены и их многолетняя изменчивость	21
<i>М.М. Иванов</i> История и перспективы исследований эрозионно-акку- мулятивных процессов в бассейнах рек, подвергшихся интенсивному Чернобыльскому загрязнению, на примере р. Упы	29
<i>А.А. Ильина, В.Н. Ильин</i> Долины рек г. Чебоксары: возможности и риски при строительном освоении территории	36
<i>А.А. Камышев</i> Апробация критерия квазиоднородности потока И.Ф. Карасева на реальных руслах крупнейших рек на примере Оби и Лены	41
<i>Е.А. Крастынь</i> Оценка стока речных наносов с использованием доплеровских профилографов	45
<i>Ж.М. Куликова, Е.Д. Панченко, Д.А. Мигунов</i> Зимний термохалинный режим устья реки Варзуги по экспедиционным данным 2020 г.	54
<i>Е.М. Куприна</i> Исследование влияния опор моста на устьевой участок р. Ока и обоснование технологических решений по снижению нега- тивных последствий деформаций	60
<i>А.А. Куракова</i> Размывы берегов на крупнейших реках	65
<i>Д.М. Лобачева</i> Особенности геоморфологического строения Нижнего Поволжья (Бэровские бугры и палеопотоки дельты Волги)	72
<i>Р.А. Медведева</i> Геоинформационное картографирование овражной сети Саратовской области	78
<i>А.А. Мироненко, Е.П. Рец</i> Анализ современной изменчивости макси- мальных уровней воды как показателей опасности наводнений на реках Северного Кавказа	81
<i>А.В. Мищенко, В.Н. Щепотьев</i> 15-летний мониторинг изменений свойств почв в условиях «карантина» эрозионных процессов	83
<i>М.С. Осипова, Е.Д. Панченко</i> Опыт одномерного гидродинамическо- го моделирования в микро-, мезо- и макроприливных устьях малых рек	94
<i>К.Н. Прокопьева</i> Разработка региональных зависимостей определе- ния мутности воды по данным дистанционного зондирования Земли ..	101

<i>М.И. Сарнецкая</i> Влияние динамики климата на многолетние изменения гидрологических характеристик некоторых рек бассейна верхнего Днепра	108
<i>В.Ю. Украинцев</i> Строение речных долин Нижнего Заволжья	111
<i>Д.В. Фомичева, Е.Н. Шамиурина</i> Ретроспективный анализ интенсивности эрозионных процессов от эпохи Генерального межевания до наших дней (на примере ключевых участков в Московской и Тульской областях)	118
<i>А.Ю. Харитонов</i> Фрактальный анализ речных долин Чувашской Республики	122
<i>А.Г. Шарифуллин</i> Эрозионно-аккумулятивные процессы в ложбинах малых водосборов востока русской равнины за последние 250 лет	125
<i>Л.В. Шашерина</i> Следы позднеголоценовой паводковой эрозии на пойме верхнего Днепра (Смоленская область)	131
<i>Д.И. Школьный, А.С. Цыпленков, П.П. Головлев, Е.И. Бахарева, А.М. Антонюк</i> Особенности водного и руслового режима реки Анадырь по результатам исследований 2020-2022 годов	137

ПРЕДИСЛОВИЕ

25-29 апреля 2022 г. в г. Набережные Челны на базе Набережночелнинского государственного педагогического университета был проведен XIII семинар молодых учёных вузов, объединяемых Межвузовским научно- координационным советом по эрозионным, русловым и устьевым процессам при МГУ им. М.В. Ломоносова. В данном сборнике представлены статьи, написанные участниками семинара по материалам своих докладов на семинаре.

Семинар играет важную роль в обмене опытом научных исследований молодых специалистов, обсуждении новейших результатов исследований в области эрозионных и русловых процессов, налаживании творческих и деловых контактов, привлечении молодых учёных к научной и организационной деятельности. Семинар является традиционным мероприятием, проводимым Межвузовским научно-координационным советом при МГУ имени М.В. Ломоносова один раз в два года. Возглавляет Совет доктор географических наук, профессор МГУ Р.С. Чалов. XIII семинар следует считать возобновлением традиции живого общения молодых специалистов после возникшего перерыва в проведении в 2020 году, что было связано с карантинными условиями в связи с пандемией ковида.

В семинаре приняли участие более 25 молодых исследователей из университетов России. Были представлены доклады молодых учёных из Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова; Набережночелнинского государственного педагогического университета; Казанского (Приволжского) федерального университета; Пермского государственного национального исследовательского университета; Брянского государственного университета им. академика И.Г. Петровского; Белгородского государственного национального исследовательского университета; Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова и др.

В мероприятии участвовали молодые учёные – кандидаты наук, научные сотрудники и преподаватели, аспиранты, магистранты и студенты старших курсов. Заседания Семинара проходили под руководством ведущих специалистов в области эрозионных, русловых и устьевых процессов, докторов и кандидатов наук, профессоров и ведущих научных сотрудников Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Семинар способствует решению таких проблем фундаментальной науки в области исследования эрозии почвы, овражной эрозии и русловых процессов в условиях естественных и антропогенных изменений природной среды и климата.

Доклады молодых учёных касалась широкого круга исследовательских задач. В частности, рассматривались вопросы, связанные с изучением формирования стока взвешенных наносов, русловых деформаций, эволюции дельтовых и пойменных комплексов, методики русловых исследований, миграции загрязнителей в речных системах, деградация почвенных ресурсов и др.

Следующий XIV семинар молодых ученых университетов, объединяемых советом намечено провести в 2024 г. в Брянском государственном университете им. академика И.Г. Петровского.

Председатель бюро молодежной секции Межвузовского совета
П.П. Головлев

ПРОБЛЕМЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ В ВОДООХРАННЫХ ЗОНАХ РЕК КРЫМА*

(научный руководитель – д.г.н., проф., Ф.Н. Лисецкий)

Общая протяженность речной сети Крыма составляет 5996 км [Ресурсы ..., 1966]. Гидрографическое описание дано в водном реестре для 283 рек длиной более 5 км (включая сухие балки, а также 26 водотоков длиной менее 5 км, но имеющих гидрографическую значимость). Их суммарная длина составляет 4012 км. Лишь пять рек полуострова имеют длину более 50 км, самая протяженная из них – р. Салгир. Густота речной сети распределена неравномерно: для рек Горного Крыма она составляет 0,43 км/км², на горную часть приходится 85% объема речного стока [Иванкова, 2021]. Для рек предгорий густота уменьшается до 0,20 км/км², а в Степном Крыму – до 0,07 км/км². Другая особенность этой части полуострова – это отсутствие постоянных водотоков на части крупных (более 10 тыс. га) водосборов. Это преимущественно балки Тарханкута (Старый Донузлав, б. Ахтанская и др.), северного Присивашья, Керченского полуострова.

Интенсивная антропогенная деятельность на водосборах рек создает риски по устойчивому функционированию речных систем. Территория Крыма является аграрно-развитым регионом: под растениеводство используется 53,5% площади полуострова – это пашни, виноградники, сады. Почти 40% занимают территории с естественной растительностью, древесно-кустарниковая растительность в основном представлена в лесных массивах горной зоны полуострова. Такая структура угодий создает повышенную сельскохозяйственную нагрузку на водосборах, способствует усилению эрозионных процессов, транспорту агрохимикатов вместе с почвенными наносами в речную сеть.

Для охраны водных объектов от загрязнения и деградации законодательством России (статья 65 Водного кодекса РФ [2006]) предписано устанавливать вокруг них водоохранные зоны, на которых действует специальный режим осуществления хозяйственной и иной деятельности. Граница водоохранной зоны устанавливается от береговой линии водных объектов, определение которой связано с рядом методических сложностей [Сатдаров, 2016]. В данной работе береговые линии проводили условно, что допустимо, учитывая региональный масштаб исследования. В пределах водоохранных зон запрещается: внесение сточных вод для удобрения, размещение кладбищ, скотомогильников, мест захоронения отходов, хранение опасных веществ, распыление, хранение (ограничено) и применение пестицидов,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-67-46017 - Эколого-реабилитационное землепользование в районах интенсивной деградации почв Европейской России)

агрохимикатов, движение и стоянка транспортных средств, функционирование автозаправочных станций и пунктов технического обслуживания, хранение горюче-смазочных материалов, сброс сточных вод, добыча полезных ископаемых. В пределах водоохранных зон также устанавливаются прибрежные защитные полосы, в которых действуют еще более строгие ограничения хозяйственной деятельности: запрещается распашка земель, размещение отвалов размываемых грунтов и выпас скота.

Ширина водоохранной зоны зависит от длины водотока и устанавливается следующим образом: для истоков и водотоков менее 10 км – 50 м, для водотоков от 10 до 50 км – 100 м, для водотоков более 50 км – 200 м. Для водоемов, приуроченных к водотокам ширина водоохранной зоны аналогичная, а для изолированных водоемов – 50 м, если их площадь более 0,5 км². Ширина прибрежной защитной полосы зависит от уклона прирусловой территории: для нулевого и обратного уклона – 30 м, для уклона 0-3° – 40 м, для уклона более 3° – 50 м.

Водоохранная зона считается установленной с момента ее внесения в Единый государственный реестр недвижимости (далее ЕГРН). Сведения о поставленных на учет зонах можно получить из публичной кадастровой карты в разделе «ЗОУИТ» (зоны с особыми условиями использования территорий). Согласно полученным сведениям, водоохранные зоны установлены всего для 81 водотока Крыма. Причем для крупнейших водотоков их внесение в ЕГРН до конца не завершено. Из 8 рек полуострова длиной более 50 км лишь для двух (Бурулча и Сухой Индол) водоохранные зоны учтены в полной мере. Реки Салгир, Альма и Бельбек имеют частично учтенные водоохранные зоны, для рек Карасевка и Малая Карасевка работы по постановлению водоохранных зон еще не проводились. Имеются случаи, когда водоохранные зоны устанавливаются для сухих ложбин, нередко запаханых, без признаков постоянного водотока (б. Чатырлык, балки Керченского полуострова).

В целях анализа современной структуры землепользования и рисков для водных объектов Крымского полуострова были построены водоохранные зоны с учетом требований водного кодекса (рис. 1).

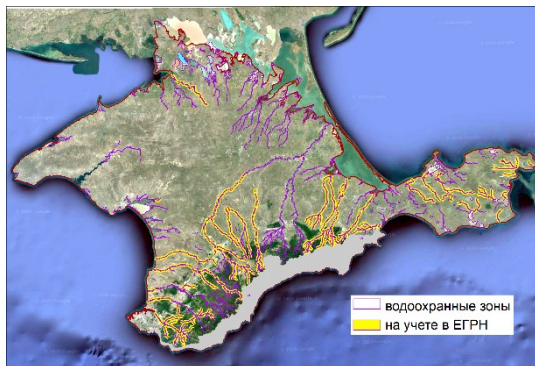


Рис. 1. Водоохранные зоны водотоков Крыма

Векторизацию гидрографической сети проводили по топографическим картам масштаба 1:200000. Для каждого водотока, занесенного в базу геоданных [Вугуак, 2021], вычислили длину и построили буферную зону определенной ширины. Также учитывали и водоемы с учетом требований к их площади. Реки юго-восточного макросклона Крымских гор не рассматривали, поскольку специфика землепользования в них более рекреационная, чем сельскохозяйственная.

Для анализа структуры угодий по космическим снимкам высокого разрешения в границах водоохранных зон рек была выполнена векторизация землепокровий. Таким образом, в них определили долю застройки, пашни и древесно-кустарниковой растительности (табл. 1).

Таблица 1. Оценка структуры землепользования в водоохранных зонах рек Крыма

Ландшафтная зона	Застройка		Распаханность		Лесистость		Всего, км ²
	км ²	%	км ²	%	км ²	%	
Равнинный Крым	28	7,4	101	26,6	2	0,5	380
Предгорья	34	15,5	61	27,9	30	13,7	219
Горный Крым (без учета ЮБК)	10	6,9	7	4,8	105	72,4	145
Всего	72	9,7	169	22,7	137	18,4	744

Установлено, что водоохранные зоны крымских рек испытывают сильный антропогенный прессинг – под застройкой или сельскохозяйственными угодьями находится 32,4% их площади. Всего в их границах насчитывается 169 км² распахиваемых территорий, 9,7 км² земель застроено. Больше всего в растениеводстве задействованы водоохранные зоны в равнинной части полуострова – 26,6% их площади распахиывается (рис. 2). Для многих рек равнинной части Крыма распашка водоохранных зон достигает 50%, у Саглира и Сухого индола этот показатель более 60%.

Типична ситуация для равнинных рек, когда пашня доходит почти вплотную до берега реки, захватывая не только водоохранную зону, но и прибрежную защитную полосу. Здесь уже имеет место прямое нарушение земельного и водного законодательства, поскольку в границах прибрежной защитной полосы распашка запрещена.

Средняя лесистость водоохранных зон достаточно высокая и составляет 18,4%. Однако при сравнении по ландшафтным зонам проявляется ее крайне неравномерное распределение: лесистость водоохранных зон в равнинном Крыму менее 1%, в предгорьях – 13,7%, в то время как в горной части достигает 72,4%. Есть бассейны с достаточно протяженной речной сетью, где полностью отсутствует облесение в водоохранной зоне (рис. 3).

Катастрофическая нехватка лесистости и неконтролируемая распашка в водоохранных зонах Равнинного Крыма способствуют усилению процессов деградации малых рек, усугубляет ситуацию с загрязнением и обмелением водотоков. Результаты исследования показывают потребность в реорганизации сельхозугодий в границах водоохранных зон и планирование мероприятий по лесомелиорации этих территорий.

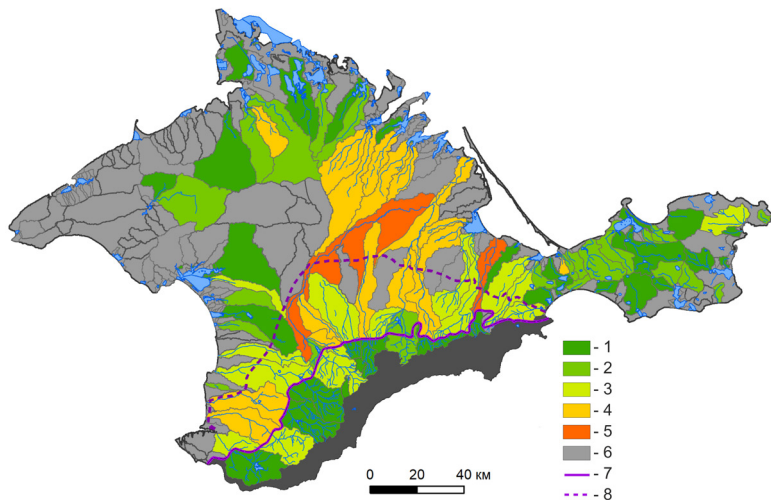


Рис. 2. Антропогенная преобразованность водоохранных зон Крыма по бассейнам рек.

Суммарная доля распаханности застройки в водоохранной зоне, %: 1 – 0.0-10.0, 2 – 10.1-20.0, 3 – 20.1-40.0, 4 – 40.1-60.0, 5 – более 60; 6 – бассейны без постоянных водотоков, 7 – граница высокогорий, 8 – граница предгорий

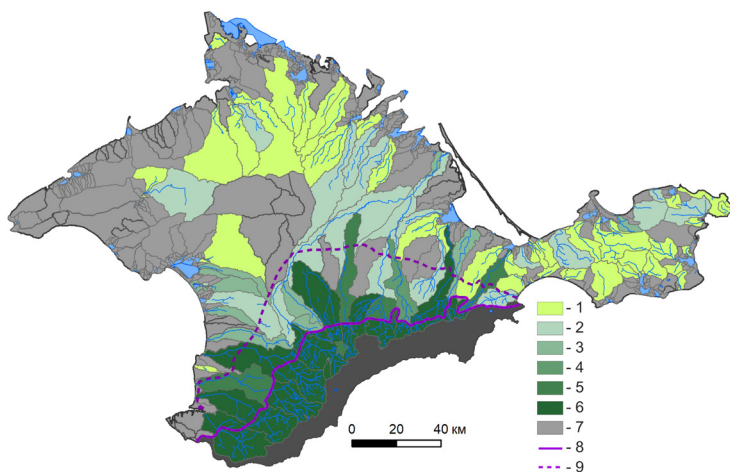


Рис. 3. Лесистость водоохранных зон Крыма по бассейнам рек.

Доля лесистости, %: 1 – 0, 2 – 0.1-1.0, 3 – 1.1-5.0, 4 – 5.1-10.0, 5 – 10.1-15.0, 6 – 15.1-99.3; 7 – бассейны без постоянных водотоков, 8 – граница высокогорий, 9 – граница предгорий

ЛИТЕРАТУРА

Водный кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ (действующая редакция от 02.05.2022), 2006. 34 с.

Иванкова Т.В. Совершенствование функционирования и управления природно-техническими системами бассейнов малых рек (на примере реки Альмы Республики Крым) // Тридцать шестое пленар. межвуз. координац. совещ. по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов. Докл. и краткие сообщ. Ижевск: Изд. центр «Удмурт. университет», 2021. С. 96-98.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 6. Украина и Молдавия. Вып. 4. Крым. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 344 с.

Сатдаров А.З. Методические проблемы установления охранных зон водотоков и опыт их решения на примере водных объектов Республики Татарстан // Эрозионные, русловые и устьевые процессы (исследования молодых ученых университетов). Сб. статей по материалам XI семинара молодых ученых вузов, объединяемых советом по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов, Ниж. Новгород: Мининский ун-т, 2016. С. 204-210.

Buryak Zh. The geographic information system on the environmental and economic state of the river basins of the Crimea // 21th International Multidisciplinary Scientific GeoConference – SGEM 2021. Conference proceedings. Water resources, forest, marine and ocean ecosystems. Is. 3.1., Vienna, Austria, 2021. PP. 369-376.

О.Е. Вагина, В.М. Подковырина, О.Н. Пашкин, А.И. Фомина, О.Н. Чипурина
*Нижегородский государственный педагогический
университет им. Козьмы Минина*

ДИНАМИКА ПРОТЯЖЕННОСТИ РУСЛОВОЙ СЕТИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ВОДОТОКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА РЕКИ БИРЛЯ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

(научный руководитель – к.г.н., доц. А.Е. Асташин)

Водосборный бассейн, в силу его специфических особенностей (иерархичность, выраженные внутренние интегрирующие связи, отчётливые границы), можно рассматривать как пространственный природный каркас, определяющий характер и территориальные рамки хозяйственной деятельности [Ulengov et al., 2018; Gaifutdinova et al., 2016]. Реки являются важнейшим компонентом ландшафта, определяющим его качественные характеристики. Работа посвящена анализу динамики протяжённости русловой сети элементарных водотоков, рассматриваемой как индикатор водности притоков малых рек.

Цель исследования: установление динамики протяженности русловой сети в зоне широколиственных лесов в XXI веке (на примере водосбор-

ного бассейна реки Бирля Республики Татарстан, Россия) в условиях высоких антропогенных нагрузок

Материалы и методы исследования: описательный, полевой, метод ключей, картографический, статистический, экстраполяции, ГИС-анализа, корреляции.

Объект исследования: элементарные водотоки водосборного бассейна реки Бирля (Республика Татарстан).

Предмет исследования: анализ динамики протяженности русловой сети элементарных водотоков бассейна реки Бирля.

Бирля – река в Татарстане, является левым притоком реки Свияга. Длина реки 48 км. Площадь водосборного бассейна составляет 389 км. Изучаемая территория лежит в пределах Приволжской возвышенности в подзоне широколиственных лесов. Литогенная основа бассейна представлена суглинками на водоразделах и склонах. Территория водосборного бассейна расчленена оврагами и балками. Изучаемая территория разделена рекой Бирля на две неодинаковые части: более возвышенную и обширную южную (правобережную) и меньшую, сниженную северную (левобережную). Климат изучаемой территории умеренно-континентальный.

По состоянию на 2001 г. в бассейне были широко представлены временные водотоки, их суммарная протяжённость составляла 60,4 км, что сопоставимо с суммарной протяжённостью постоянных водотоков – 73,3 км. Эта особенность, вероятно, обусловлена высокой степенью распаханности территории (60%) и низкими показателями лесистости (18%).

Причиной интенсивного и давнего хозяйственного освоения рассматриваемой территории стал комплекс факторов: сравнительно удобный для ведения сельского хозяйства рельеф, благоприятный климат, хорошая дренированность территории и плодородные почвы: серые лесные и выщелоченные чернозёмы. Естественная растительность была представлена липой и дубом, однако к настоящему времени она сильно нарушена и часто замещена мелколиственными породами или занята пашней, залежью и поселесными лугами. Учёт природных особенностей исследуемой территории позволяет проанализировать механизмы динамики протяженности русловой сети элементарных водотоков.

Суммарная протяжённость постоянных водотоков в 2001 г. составляла 73,3 км, из них 57,6 км приходилось на долю элементарных водотоков, которых на изучаемой территории существовало 35. Таким образом, в 2001 году на долю элементарных водотоков приходилось 78.6% протяжённости постоянных водотоков бассейна реки Бирля [Асташин и др., 2020]. Суммарный показатель сокращения протяжённости русловой сети на изученных водотоках составил 2.0 км. Главным фактором, определяющим сокращение протяжённости русловой сети, является высокая распаханность и практически полное отсутствие лесов на водосборных площадях водотоков.

На семи из восемнадцати изученных элементарных водотоков обнаружено увеличение протяжённости русловой сети, в сравнении с их состоянием на 2001 год. Суммарный показатель увеличения протяжённости

русловой сети на изученных водотоках составил 1.4 км (рис. 1). Главным фактором увеличения протяжённости русловой сети стал локальный подъём уровня поверхностных и грунтовых вод в результате сооружения грунтовой плотины в долине водотока. В ряде случаев подъём уровня воды и увеличение протяжённости русла вызвано деятельностью бобров, построивших плотины. Важным фактором развития русловой сети стало рациональное ведение хозяйства на прилегающих территориях: распашка ведётся только на плакорах и приводораздельных склонах; придолинные склоны пашней не затронуты, по верхним бровкам склонов речных долин высажены лесополосы, способствующие задержанию снега и замедляющие развитие эрозии.

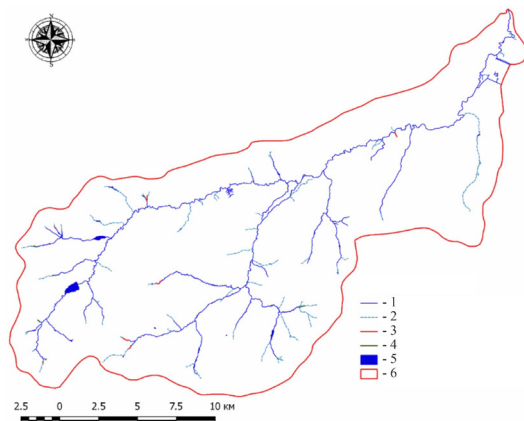


Рис. 1. Динамика протяженности русловой сети элементарных водотоков в бассейне р. Бирля в период 2001-2020 гг.

1 – постоянные водотоки (по состоянию на 2020 год), 2 – временные водотоки (по состоянию на 2020 год) 3 – участки пересохших русел (в период с 2001 по 2020 гг.), 4 – участки развившихся русел (в период с 2001 по 2020 гг.), 5 – озёра и пруды (по состоянию на 2020 год), 6 – граница водосборного бассейна р. Бирля

То, что суммарные показатели протяжённости развившихся (1.4 км, или 2.4% по отношению к протяжённости русел элементарных водотоков в 2001 году) и сократившихся (2.0 км, или 3.5% по отношению к протяжённости русел элементарных водотоков в 2001 году) русел элементарных водотоков сопоставимы и сравнительно невелики, говорит о том, что явно выраженной тенденции к сокращению или развитию протяжённости русловой сети элементарных водотоков в XXI веке в зоне широколиственных лесов в условиях высокой антропогенной нагрузки, нет. Отрицательная динамика протяжённости русел элементарных водотоков составила всего около 1%.

Изменения лесистости, как важного фактора, влияющего на динамику протяжённости русловой сети, видно, что в бассейне реки Бирля в XXI веке произошло незначительное сокращение лесопокрытых площадей – от 69,7 км²

(лесистость 18%) в 2000 году до 68,7 км² в 2019 году (лесистость 17%) (рис. 2). Отрицательная динамика составила всего около 1%, что соотносится с показателями динамики протяжённости русловой сети в исследуемый период.

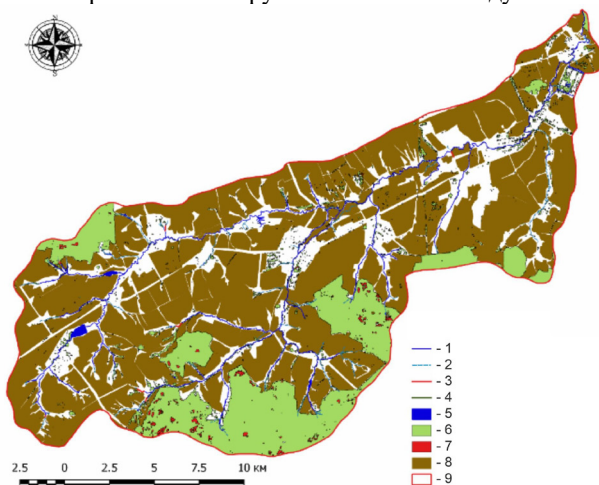


Рис. 2. Местные факторы динамики протяжённости русловой сети элементарных водотоков в XXI веке.

1 – постоянные водотоки (по состоянию на 2020 год), 2 – временные водотоки (по состоянию на 2020 год), 3 – участки пересохших русел (в период с 2001 по 2020 гг.), 4 – участки развившихся русел (в период с 2001 по 2020 гг.), 5 – озёра и пруды (по состоянию на 2020 год), 6 – покрытые лесом территории (по состоянию на 2019 год), 7 – территории, лишившиеся леса в период с 2000 по 2019 гг., 8 – пахотные угодья (по состоянию на 2020 год), 9 – граница водосборного бассейна р. Бирля

Общий показатель динамики протяжённости русловой сети элементарных водотоков составил 3.4 км, что составляет 15% от суммарной протяжённости изученных нами элементарных водотоков. Динамика протяжённости русловой сети элементарных водотоков зависит от местных условий – характера и способа ведения хозяйственной деятельности, геолого-геоморфологических условий, лесистости и даже особенностей животного мира.

Существующая в XXI веке проблема деградации рек, имеет геосистемные, ландшафтные причины, и может быть успешно решена только на основе системного подхода. Большое значение в этом деле имеет не только применение эффективных способов ведения хозяйства, но и целенаправленные действия по созданию сети охраняемых природных территорий.

ЛИТЕРАТУРА

Асташин А.Е., Пашкин О.Н., Ватина О.Е., Фомина А.И., Чипурина О.А. Количественные и качественные параметры динамики протяжённости русловой сети элементарных водотоков в зоне широколиственных лесов в

условиях высоких антропогенных нагрузок в XXI веке (на примере водосборного бассейна реки Бирля Республики Татарстан // Тр. 5-й Всеросс. науч. конф. «Проблемы экологии Волжского бассейна» («ВОЛГА-2020»). Вып. 3. - г. Ниж. Новгород: Изд-во ВГУВТ. 2020, С. 1-5.

Ulengov R.A., Khuziakhmetov A.N., Nasibullov R.R., Yarullin I.F. Approaches to the environment assessment of landscapes in the Republic of Tatarstan // *Ekoloji*. 2018. Т. 27. № 106. С. 1713-1717.

Gaifutdinova R.A., Yermolaev O.P. Factors of gully erosion on agricultural lands of the Republic of Tatarstan // *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Т. 8. № 4. С. 24146-24152.

Yermolaev O.P., Selivanov R.N. The use of automated geomorphological clustering for purposes of urban planning (the example of the city of Kazan) // *World Applied Sciences Journal*. 2014. Т. 30. № 11. С. 1648-1655.

Ermolaev O.P., Maltsev K.A., Mukharamova S.S., Kharchenko S.V., Vedeneva E.A. Cartographic model of river basins of European Russia // *Geography and Natural Resources*. 2017. Т. 38. № 2. С. 131-138.

А.М. Гафуров, к.г.н., с.н.с.

Казанский (Приволжский) федеральный университет

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ СТРУЙЧАТОЙ ЭРОЗИИ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ*

(научный руководитель – д.г.н., проф О.П. Ермолаев)

Для решения задачи картографирования струйчатой эрозии с учетом существующих ограничений, применяются подходы, основанные на ручном выделении размывов по данным ДЗЗ, а именно космических снимков [Yermolaev, Medvedeva, Platoncheva, 2017; Yermolayev, Platoncheva, Essuman-Quainoo, 2020]. Подобное решение позволяет добиться наилучшей точности, но трудоемко и малопроизводительно. Для решения этой проблемы необходима разработка подходов, основанных на автоматизации выделения струйчатых размывов, что является целью данной работы. Исходные данные, используемые как картографическая основа, задают перечень возможных подходов, которые можно применить для решения поставленной цели. Самый простой из них – распознавание объектов на основе порогового подхода, где порог определяет границу отражательной способности спектральных данных, характерных для объекта исследования. Такие подходы хороши для определения различных типов землепользования [Walter, 2004; Zhang и др., 2018]. Однако, при распознавании промоин с применением по-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект МК-2005.2021.1.5 - Создание системы автоматизированного крупномасштабного картографирования струйчатой почвенной эрозии Среднего Поволжья)

добного подхода на различных типах почв, результат будет непредсказуемым. Для учета пространственной изменчивости факторов окружающей среды можно использовать методы машинного обучения, например, хорошо зарекомендовавший себя метод Случайный лес или Support Vector Machine [Dinh и др., 2021; Ghosh, Maiti, 2021]. Однако, подобные подходы дают только вероятность того, что в конкретном пикселе может быть почвенная эрозия, при этом не выделяя сами размыты в «древовидный рисунок». Кроме того, методы очень чувствительны к количеству входных данных – чем больше информации используется для анализа, тем устойчивее будут результаты. На небольших водосборах подобные подходы могут успешно применяться, для больших территорий их применимость под вопросом.

В последнее время наблюдается стремительное увеличение числа работ, связанных с использованием глубоких нейронных сетей (ГНС) для семантической сегментации данных дистанционного зондирования. Этому способствовала как увеличение качества данных ДЗЗ, так и увеличение вычислительных мощностей, доступных исследователям. В настоящее время DNN позволяют успешно решать задачи автоматизированного дешифрирования антропогенных объектов [Liu и др., 2020; Cai, Chen, 2021; Luo, Li, Yan, 2021], береговой линии [Aryal и др., 2021; Blais, Akhloufi, 2021], землепользования [Garg и др., 2021; Dong и др., 2021; Wei и др., 2021], динамики растительного покрова [Illarionova и др., 2021; Song и др., 2022] и экзогенных процессов [Gafurov, Yermolayev, 2020; Du и др., 2021]. Во всех случаях авторы отмечают более высокую точность распознавания интересующих объектов по сравнению с другими методами и подчеркивают возможность масштабирования обученных моделей. Для решения задачи распознавания и картографирования струйчатых эрозионных размытов глубокие нейронные сети не применялись. Тем не менее, важность изучаемой проблематики и перспективность использования искусственного интеллекта для решения данной задачи определяет необходимость разработки соответствующей методики.

В качестве исходных данных для разработки методики распознавания струйчатой эрозии использовались данные безоблачного композита миссии Sentinel-2 за весенний период – апрель-июнь. Для распознавания использовались снимки ближнего инфракрасного диапазона с исходным разрешением. Создание композита производилось с использованием Google Earth Engine (GEE) [Gorelick и др., 2017], продукт «Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A» (COPERNICUS/S2_SR). GEE позволяет производить обработку больших данных дистанционного зондирования и облегчает некоторые рутинные операции. Для создания композита была произведена фильтрация снимков 2018–2019 гг. по дате, чистка снимков от облаков и теней, расчет медианных значений яркости пикселей и обрезка снимков по границам территории исследования, а также перепроецирование в систему координат проекций WGS 84 / Pseudo-Mercator (EPSG:3857).

В полученном весеннем композите была выбрана и вырезана область с визуально наибольшей густотой промоинной сети и присутствием основных классов землепользования – водных, антропогенных, лесных и

сельскохозяйственных объектов. Для этой территории площадью более 2 500 кв. км была произведена сплошное ручное распознавание струйчатой эрозии для создания выборки эталонных данных.

Полученные выборка была растеризована и приведена к разрешению фрагмента космического снимка, после чего оба растра были разрезаны на патчи размером 256x256 пикселей. Всего, таким образом, было получено 10933 пары космический снимок-бинарная маска. Полученные растры были дополнительно случайным образом трансформированы для искусственного аугментирования количества растров в 3 раза. Полученный датасет был разделен в соотношении 1/5 на обучающую и тестовую выборки.

В качестве архитектуры нейронной сети была выбрана LinkNet – полностью сверточная нейронная сеть для семантической сегментации изображений [Chaurasia, Culurciello, 2017]. В отличие от хорошо зарекомендовавшей себя, в том числе для решения задач семантической сегментации космических снимков в геоморфологических исследованиях [Gafurov, Yermolayev, 2020], архитектуры U-NET [Ronneberger, Fischer, Brox, 2015], у LinkNet в его сетях кодера и декодера вместо конволюционных блоков используются остаточные. Как показала практика, это позволяет лучше производить семантические обобщения в том числе для дендровидных конструкций, которые представляют собой промоинные сети. Методом проб и ошибок стало понятно, что наилучших результатов в дешифрировании промоин удастся добиться при применении трансферного обучения – метода обучения глубоких нейронных сетей, который позволяет использовать знания, полученные об одной проблеме глубокого обучения, и применять их к другой, но со схожей задачей. В нашем случае были использованы энкодеры, используемые для классификации изображений DenseNet [Iandola и др., 2014]. В отличие от других схожих моделей, здесь признаки («фичи»), прежде чем они будут переданы в следующий слой, не суммируются, а конкатенируются (объединяются, channel-wise concatenation) в единый тензор. Алгоритм обучения и применения модели производился в среде программирования Python 3.7 с использованием библиотеки Keras. На вход нейронной сети подавался стек пар снимок-маска, предварительно подготовленный на предыдущем этапе. Для предотвращения переобучения модели был использован мониторинг EarlyStopping, а в качестве метрик проверки обучаемости модели использовалась метрика IOU Score - коэффициент Жаккара [Jaccard, 1912].

Обученная нейронная сеть RECNN (Rill Erosion Convolutional Neural Network) была проверена на независимом тестовом наборе данных. Точность распознавания составила 0.62, F1-мера – 0.76, loss-функция – 0.27. Качественно анализируя полученные результаты оценки (рис. 1), можно отметить достаточно высокий уровень распознавания промоинной сети, в том числе визуально.

Особенно важно, что не зафиксировано ни одного кейса выделения вместо промоин оврагов или грунтовых дорог, в изобилии содержащихся на территории исследования.

Обученную и протестированную модель было решено применить на всей территории исследования (рис. 2). Для полученной геометрии была рассчитана длина, которая была агрегирована на сетку бассейнов [Yermolaev и др., 2018]. Анализируя полученные карты, становится очевидным наличие определенных кластеров. Первый кластер – область наибольшей густоты струйчатой эрозии – находится в левобережной части Волги в Саратовской области. Второй кластер – область средней эрозии – характеризует правобережье Волги Саратовской и Закамье Республики Татарстан. Территории Республик Марий Эл и Чувашию характеризуются, преимущественно, низкой эрозией, формируя третий кластер.

Всего на территории исследования информация агрегирована на 3037 бассейнах со средней площадью 117.83 кв. км. Средняя густота струйчатой эрозии на всей территории исследования составляет 0.23 км/кв. км. Максимальная густота составляет 3.79 км/кв. км. В целом, на территории исследования распределение суммарной длины струйчатой эрозии логнормальное, то есть большая часть измерений содержит, в целом, относительно небольшие значения суммарной длины.

Для анализа зависимостей густоты струйчатых размывов от основных природно-антропогенных факторов были использованы обобщенные аддитивные модели (GAM) [Hastie, Tibshirani, 1999]. Данные модели позволяют оценить зависимости в виде сплайновых функций, что позволяет лучше производить обобщения и комплексно изучить зависимость переменной от фактора [Mukharamova и др., 2021; Yermolaev, Mukharamova, Vedeneva, 2021].

Использование обобщенных моделей позволило не только подтвердить известные связи почвенной эрозии с природными факторами, но и обнаружить комплексные нелинейные связи. Наблюдается устойчивое густоты эрозионной сети с увеличением средней высоты бассейна, но до 100 м, после чего рост густоты сменяется уменьшением густоты и ее стабилизацией. Влияние морфометрии рельефа также подтверждается зависимостью густоты струйчатой эрозии от показателя разброса высот в бассейне – разницы между максимальной и минимальной высотами. В целом, чем меньше разница высот, тем меньше густота, однако, в основе своей наибольшее уменьшение интенсивности струйчатой эрозии наблюдается в бассейнах с небольшой разницей высот (до ~70 м), после чего интенсивность уменьшения густоты не столь явно выражена и, по сути, остается постоянной.

Климатические факторы оказывают не меньшее влияние на характер протекания эрозионных процессов на территории исследования, отчасти дополняя топографическую и хозяйственную предрасположенность территории к развитию промоин. Интересна связь густоты струйчатой эрозии и средней температуры воздуха в январе – чем ниже среднемесячная температура в самый холодный месяц в году, тем интенсивнее характер процесса. В целом, связь интенсивности струйчатой эрозии и увлажнения прямая, наблюдается устойчивый тренд к увеличению густоты эрозионной сети с увеличением слоя осадков в теплый период вплоть до ~270 мм, после чего роль осадков уменьшается при сохранении правила – «много осадков – интенсивнее эрозия».

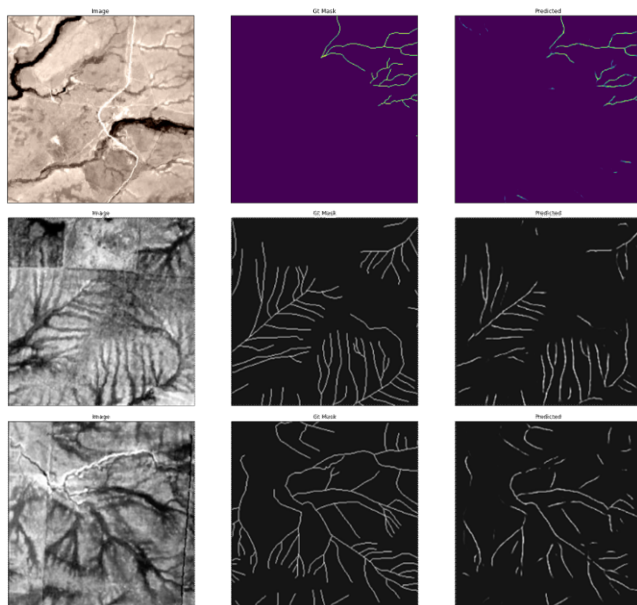


Рис. 1. Пример результатов применения RECNN на тестовом наборе данных (слева на право: снимок Sentinel 2, результаты экспертного выделения размывов, результаты автоматизированного выделения размывов)

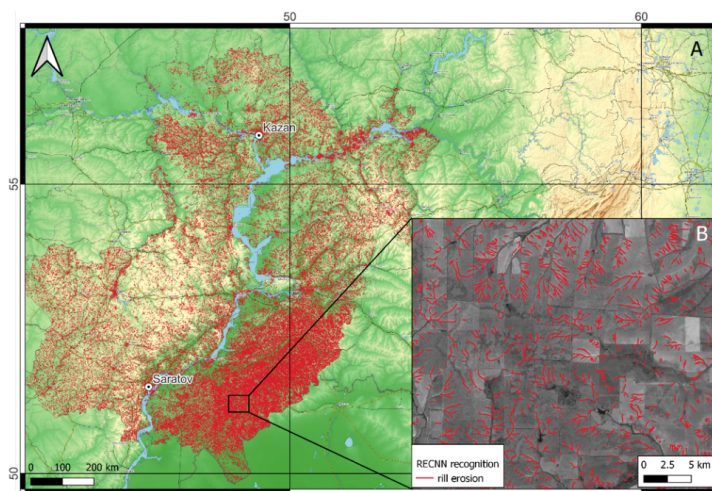


Рис. 2. Результаты распознавания струйчатой эрозии на всей территории исследования (A) и укрупненная область с распознанными промоинами на снимке Sentinel 2 (B)

Влияние факторов увлажнения наиболее отчетливо показывает связь густоты струйчатой эрозии и значения гидротермического коэффициента территории. Густота эрозионной сети уменьшается с увеличением ГТК вплоть до значения 0.7 – четкого рубикона между засушливой областью и увлажненной. С увеличением ГТК увеличивается интенсивность произрастания защищающей почвенной слой растительности, однако при переходе в увлажненную зону осадков становится достаточно для того, чтобы разительность не столь эффективно справлялась с почвозащитными функциями.

Стоит отдельно рассмотреть влияние почвенно-геологических условий протекания эрозионных процессов. Для анализа связи преобладающего типа почвы и суммарной длины струйчатой эрозии был проведен одnofакторный дисперсионный анализ. Основные почвы тайги и хвойно-широколиственных лесов, а также гидроморфные почвы меньше всего подвержены эрозионной деятельности. Наименьшая суммарная длина прооминной сети наблюдается на дерново-подзолистых почвах (неглубокоподзолистые и глубокие).

Дисперсионный анализ был проведен отдельно по ландшафтным зонам. Результаты подтверждают выводы, сделанные ранее – зоны сухих и типичных степей, а также полупустынь больше всего подвержены эрозионным процессам.

Также подтверждают предыдущие выводы анализ зависимости эрозионных процессов от антропогенной нагрузки. Очевидно, что с увеличением антропогенной нагрузки увеличивается и интенсивность эрозионных процессов, однако, не линейно. Максимальная интенсивность эрозии наблюдается при умеренной антропогенной нагрузке. Уменьшение суммарной длины эрозионных форм с дальнейшим увеличением антропогенной нагрузки связан с уменьшением площади не занятых городами, мануфактурами и другими антропогенными объектами территорий.

ЛИТЕРАТУРА

Aryal B. et al. Semi-automated semantic segmentation of arctic shorelines using very high-resolution airborne imagery, spectral indices and weakly supervised machine learning approaches // *Remote Sensing*. 2021. Т. 13. № 22.

Blais M.-A., Akhloufi M. A. Deep learning for low altitude coastline segmentation. , 2021.

Cai J., Chen Y. MHA-Net: Multipath Hybrid Attention Network for Building Footprint Extraction from High-Resolution Remote Sensing Imagery // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2021. Т. 14. С. 5807–5817.

Chaurasia A., Culurciello E. LinkNet: Exploiting encoder representations for efficient semantic segmentation // *2017 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP)*., 2017. С. 1–4.

Dinh T. V. et al. Predicting Rainfall-Induced Soil Erosion Based on a Hybridization of Adaptive Differential Evolution and Support Vector Machine Classification // *Mathematical Problems in Engineering*. 2021. Т. 2021. С. e6647829.

Dong Y. u òp. Land cover semantic segmentation of Port Area with High Resolution SAR Images Based on SegNet., 2021.

Du B. et al. Landslide susceptibility prediction based on image semantic segmentation // Computers and Geosciences. 2021. T. 155.

Gafurov A.M., Yermolayev O.P. Automatic Gully Detection: Neural Networks and Computer Vision // Remote Sensing. 2020. T. 12. № 11. C. 1743.

Garg R. et al. Semantic segmentation of PolSAR image data using advanced deep learning model // Sci Rep. 2021. T. 11. № 1. C. 15365.

Ghosh A., Maiti R. Soil erosion susceptibility assessment using logistic regression, decision tree and random forest: study on the Mayurakshi river basin of Eastern India // Environ Earth Sci. 2021. T. 80. № 8. C. 328.

Gorelick N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. T. 202. C. 18–27.

Hastie T., Tibshirani R. Generalized additive models. Boca Raton, Fla: Chapman & Hall/CRC, 1999. 335 c.

Iandola F. et al. DenseNet: Implementing Efficient ConvNet Descriptor Pyramids // arXiv:1404.1869 [cs]. 2014.

Illarionova S. et al. Tree species mapping on sentinel-2 satellite imagery with weakly supervised classification and object-wise sampling // Forests. 2021. T. 12. № 10.

Jaccard P. The distribution of the flora in the alpine zone // New Phytol. 1912. T. 11. № 2. C. 37-50.

Liu Y. u òp. ARC-Net: An Efficient Network for Building Extraction from High-Resolution Aerial Images // IEEE Access. 2020. T. 8. C. 154997-155010.

Luo L., Li P., Yan X. Deep learning-based building extraction from remote sensing images: A comprehensive review // Energies. 2021. T. 14. № 23.

Mukharamova S. et al. Estimating the Soil Erosion Cover-Management Factor at the European Part of Russia // IJGI. 2021. T. 10. № 10. C. 645.

Song G. et al. Monitoring leaf phenology in moist tropical forests by applying a superpixel-based deep learning method to time-series images of tree canopies // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2022. T. 183. C. 19-33.

Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // arXiv:1505.04597 [cs]. 2015.

Walter V. Object-based classification of remote sensing data for change detection // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2004. T. 58. № 3. C. 225-238.

Wei H. et al. Deanet: Dual encoder with attention network for semantic segmentation of remote sensing imagery // Remote Sensing. 2021. T. 13. № 19.

Yermolaev O., Mukharamova S., Vedeneva E. River runoff modeling in the European territory of Russia // CATENA. 2021. T. 203. C. 105327.

Yermolaev O.P. et al. Geographic Information System and Geoportal «River basins of the European Russia» // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2018. T. 107. C. 012108.

Yermolaev O.P., Medvedeva R.A., Platoncheva E V. Methodological Approaches to Monitoring Erosion of Agricultural Lands in the European Part of

Russia by Using Satellite Imagery // Uchenye Zap. Kazan. Univ.-Ser. Estestvennye Nauki. 2017. T. 159. № 4. С. 668–680.

Yermolayev O., Platoncheva E., Essuman-Quainoo B. Spatial-Temporal Dynamics of the Ephemeral Gully Belt on the Plowed Slopes of River Basins in Natural and Anthropogenic Landscapes of the East of the Russian Plain // Geosciences. 2020. T. 10. № 5. С. 167.

Zhang F. et al. A simple automated dynamic threshold extraction method for the classification of large water bodies from landsat-8 OLI water index images // International Journal of Remote Sensing. 2018. T. 39. № 11. С. 3429-3451.

Г.Б. Голубцов, аспирант

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

**МОРФОЛОГИЯ РУСЛА И РАССРЕДОТОЧЕНИЕ СТОКА СРЕДИ
ОСТРОВОВ СЛОЖНЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНО-РУКАВНЫХ
РАЗВЕТВЛЕНИЙ НИЖНЕЙ ЛЕНЫ И ИХ МНОГОЛЕТНЯЯ
ИЗМЕНЧИВОСТЬ***

(научный руководитель – д.г.н., проф. Чалов Р. С.)

Рассредоточение стока воды – важнейшая характеристика русел рек, разветвленных на рукава, особенно больших и крупнейших, которые отличаются наиболее сложной разветвленностью, характеризуются большим количеством островов, осередков, многообразием их морфометрических параметров, а также значительной суммарной шириной русла. Чрезвычайно важными являются сведения о распределении расходов воды по рукавам в разные фазы водного режима и в многолетнем плане при решении водохозяйственных и водотранспортных задач [Маккавеев, 1955] Однако, данные регулярных наблюдений на гидрологических постах не позволяют оценивать рассредоточенности стока по рукавам и протокам и могут использоваться лишь как исходный материал для расчетов, для которых необходимы сведения о морфометрии рукавов, уклонах и т.д.

Проблема усугубляется крайне малым количеством гидрологических постов, на которых проводятся измерения расходов воды, особенно на крупнейших реках. Например, на нижней Лене расходные гидропосты находятся в районе г. Якутска выше слияния с р. Алданом (г.п. Табага) и недалеко от устья намного ниже впадения р. Вилюя (г.п. Кюсюр) на расстоянии более 2000 км друг от друга. При этом водность реки увеличивается

* Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова (материалы исследований с 1971 по 2015 гг.) при финансовой поддержке РФФ (проект 18-17-00086 П – натурные исследования 2020-2021 гг., русловой анализ рассредоточения стока). Автор выражает благодарность Администрации “Ленводпути” (руководитель А.И. Сахаров) за содействие в проведении исследований.

более чем двукратно – среднегодовой расход составляет, соответственно, 7070 м³/с и 16 800 м³/с. Гидрологические посты, на которых проводятся измерения расходов, находясь в сужениях днища долины, где водный поток собирается в едином неразветвленном русле и, естественно, не отражают водность рукавов. На нижней Лене ниже устья р. Вилюя суммарная ширина реки (вместе с островами) достигает 28 км, русло разделяется островами разных размеров на 10-15 проток и рукавов в одном поперечнике, водность даже самых многоводных зачастую не превышает трети от общего расхода воды в реке. Особенно важными при анализе русловых переформирований и динамики разветвленного русла являются многолетние и сезонные колебания стока в рукавах и протоках, что необходимо, в первую очередь, для обоснования мероприятий по обеспечению безопасных условий судоходства, определения габаритов трассы фарватера, ее положения среди островов и необходимости выполнения дноуглубительных работ (при отсутствии других водопользователей). Таким образом, именно выявление закономерностей рассредоточения стока (и его трансформации во времени) среди островов сложных параллельно-рукавных разветвлений нижней Лены является основной задачей настоящей статьи.

Весь рассматриваемый участок Лены ниже устья крупного левого притока – р. Вилюя представлен тремя следующими друг за другом звеньями разветвлений: Монастырским (1240-1195 км), Черпальским (1195-1135 км) и Сахам (1135-1095 км), каждое из которых образовано десятками больших и малых островов (рис. 1). Общая длина участка по оси судового хода составляет 145 км.

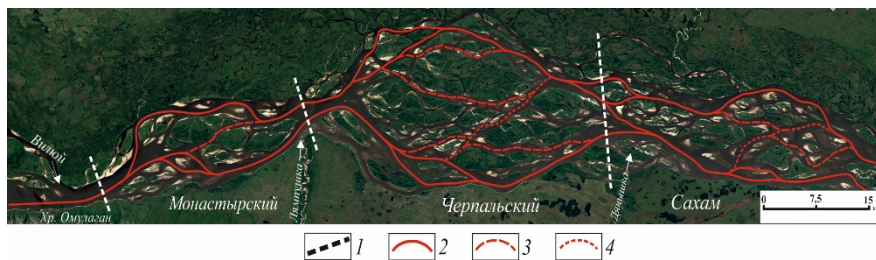


Рис. 1. Общая схема (космоснимок) разветвленного русла нижней Лены ниже устья Вилюя. 1 – границы звеньев разветвлений; 2 – положение стрежневой зоны потока в левом и правом основных рукавах и во вторичных разветвлениях основных рукавов; 3 – то же в субпараллельных рукавах; 4 – то же, в диагональных рукавах

Большая часть стока реки сосредотачивается в двух основных левом и правобережных рукавах параллельно-рукавных разветвлений [Чалов, 1979, 2011]. Правый рукав на всем протяжении участка судоходный и несколько более многоводный, расположенный вдоль или вблизи правого коренного берега (хребет Омулаган), в свою очередь, характеризуется разветвлениями второго порядка. Такие разветвления еще более характерны

для левого рукава, где они образованы бóльшим количеством островов. Острова и их группы между левым и правым рукавами в центральной части русла разделены субпараллельными им, меньшими по водности рукавами, различными по ширине и длине, между которыми и основными рукавами осуществляется гидравлическая связь. [Чалов и др., 2008]. Кроме того, ниже выступов и мысов правого коренного (в основном представленных конусами выноса правых горных притоков Ляпушки и Дянышки) и левого пойменного берегов находятся группы прибрежных островов, разделенных маловодными протоками, усиливающими отклонение стрежня потока в них от ведущих берегов [Чалов, Кирик, 2015].

Наиболее водным на протяжении всего периода регулярных наблюдений и воднотранспортного освоения реки (с конца XIX века) является правый основной рукав. Воды левого притока – р. Вилюя сосредотачиваются в левом рукаве Лены, в который поступают в полном объеме выносимые им наносы, обуславливая его мелководность и, несмотря на соразмерность со стоком воды правого рукава, формирование вторичных разветвлений и большого количества отмелей [Водные пути ..., 1995]. Большой водности и меньшей разветвленности правого рукава способствует наличие ведущего коренного берега. Водность обоих основных рукавов по их длине существенно меняется из-за отвлечения части стока или, наоборот, впадения в них рукавов между островами в центральной части русла и в прибрежных разветвлениях, отвлекающие до 10-12% расхода воды.

Измерения расходов проводились 3-5 июля 2021 г. при уровне 573-544 см по г.п. Жиганск, что соответствует срезке (превышению текущего уровня над меженным – проектным) 353-324 см, доплеровским определителем скоростей течения воды ADCP (“Acoustic Doppler Current Profiler”) типа “RiverRay” (погрешность определения расхода воды $\leq 5\%$). Для выявления многолетних тенденций рассредоточения стока в разветвлениях использовались данные, полученные в разные фазы режима в 1971-2020 гг.

Первое, верхнее из звеньев, *Монастырское разветвление* имеет протяженность 36 км (по судовому ходу 40,1 км) при наибольшей ширине русла (с островами) 12,6 км. В нем насчитывается 29 островов различных размеров, из которых 15 расположено в центральной части русла между левым и правым основными рукавами. Остальные острова образуют вторичные разветвления основных рукавов и на заходе в них. Между Монастырским и нижележащим Черпальским разветвлением, где русло сужается более чем в 2 раза (с 12,6 до 5,1 км), располагается единая акватория без островов протяженностью около 4 км. *Черпальский узел* (рис. 2) длиной 55 км имеет наибольшую ширину до 28 км, что является абсолютным максимумом для всей Лены. Количество островов в центральной части между левым и правым основными рукавами – более 45, образующих разветвления этих рукавов – более 15 (из них 6 в периферийной части русла).

В *разветлении Сахам* наибольшая суммарная ширина реки – 16,6 км, его шаг – 43,3 км, длин по судовому ходу – 46 км. Количество островов между лево- и правобережными рукавами – 36. Между разветвлениями

Черпальским и Сахам ширина русла сокращается до 11 км, но, в отличие от сужения между Монастырским и Черпальским разветвлениями, здесь сохраняются прибрежные разветвления как с левой, так и с правой стороны русла, образованные несколькими островами.

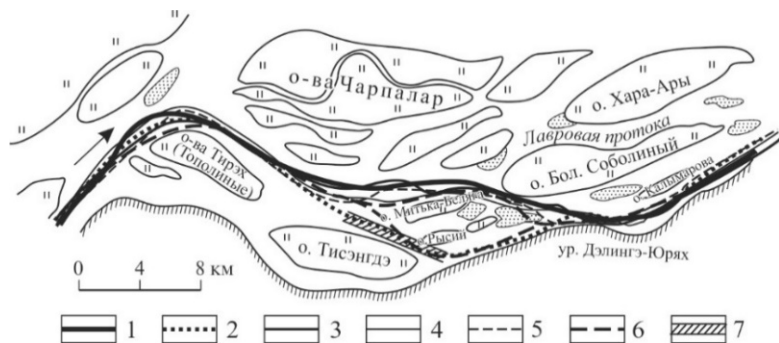


Рис. 2. Общий вид и изменения положения судового хода на перекатах Черпальский и Рысий: 1 – современное, 2020 г.; 2 – развивающееся, прогнозируемое на 2023-2025 гг.; 3, 4, 5 – в разные годы (1982-2015 гг.); 6 – прогнозируемое на 2022 г.; 7 – рекомендуемые дноуглубительные прорезы.

Монастырское разветвление (1240-1195 км), начинающиеся непосредственно ниже устья Вилюя, образованно группой больших центральных островов – о. Джура, о. Оймьякон, о. Бахсы, о. Сордоннох и др. Их положение и водность левого и правого (судоходного) рукавов в ретроспективном плане менялась незначительно (табл. 1).

Таблица 1. Измеренные расходы воды в Монастырском разветвлении

Створ №	Рукав, протока	24.06 – 1.08. 1974 г.		05.07.2021 г.	
		Q, м ³ /с (%)	Срезка, см	Q, м ³ /с (%)	Срезка, см
1	Единое неразветвленное русло ниже устья р. Вилюя	23589 (100)	297	29478 (100)	324
2	Основной рукав между прибрежными о-вами Люккяр (справа) и безымянными (слева)	20994 (89,0)	257	28229 (95,8)	324
3	Прибрежные протоки среди о-вов Люккяр	355 (1,5)	244	2489 (8,4)	324
4	Левая протока у о. Монастырского на заходе в левый основной рукав	2601 (11,0)	244	5468 (18,5)	324
5	Субпараллельный рукав между о-вами Оймьякон и Сордоннох	675 (2,9)	261	3812 (12,9)	324
6	Левый основной рукав	10412 (42,1)	188	10703 (36,3)	324
7	Субпараллельный (центральный) рукав между о-вами Бахсы и Сордоннох	556 (2,1)	188	1751 (6)	324
8	Правый основной (судоходный) рукав	14272 (59,5)	188	17195 (58,3)	324

Острова разделяют реку на два основных рукава, между которыми гидравлическая связь осуществляется по маловодным межостровным протокам, водность наиболее крупной из которых (диагональной между о-вами Сордонных и Оймякон) составляет 12,9 % (створ № 5). Водность основных рукавов – левого и правого в узле разветвления перед оголовком центральных островов – около 40 и 60 %, соответственно (створы № 6 и 8). В левый рукав из диагональной протоки (створ № 7) поступает всего 6%, остальная часть воды по протокам между о-вами Оймякон, Бахсы и Джюра частично возвращается в правый рукав. В прибрежные протоки за о-вами Люккяр перед разделением русла на основные рукава, поступает не более 8-10%, а в отдельные годы 2–3% от общего расхода, даже при относительно высоких уровнях воды. На заходе в левый рукав он разделяется о. Монастырским на две равные по водности части (около 18%, створ № 4). Но ниже по течению в нем находится цепочка островов и осередков, образующих систему сопряженных разветвлений; весь расход левого рукава собирается в створе № 6 между звеньями этих разветвлений 2-го порядка. Правый рукав, таким образом, имеет разветвленное русло, отдавая лишь незначительную часть стока (или принимая его) в межостровные или прибрежные протоки.

В Монастырском, как и в Черпальском разветвлении, при его значительной ширине (до 28 км, преобладает по водности правый основной рукав (42,2%) вдоль высокого коренного берега (табл. 2.)

Таблица 2. Измеренные расходы воды в Черпальском разветвлении

Створ №	Рукав, протока	5.08-6.09. 1974 г.		04.07.2021 г.	
		Q, м ³ /с (%)	Срезка, см	Q, м ³ /с (%)	Срезка, см
1	Правый между о. Бол. Соболиный и правым берегом (судоходный)	13 742 (51,6)	294	13 402 (42)	333
2	Между о. Рысьим и о. Бол. Соболиным	–	–	5841 (18,3)	333
3	Диагональный рукав у о. Бол. Соболиного	6837 (25,7)	294	1996 (6,3)	333
4	Лавровая протока	3503 (13,1)	294	4062 (12,7)	333
5	Левый рукав (протока справа от о. Тьятенгелиях)	6508 (24,4)	294	6912 (21,7)	333
6	Протока слева от о. Тьятенгелиях	1501 (5,6)	294	3022 (9,5)	333
7	Центральный рукав между о-вами Уэс-Станаах и Черпальскими	2408 (9,0)	294	2936 (9,2)	333
9	Левая протока на заходе в диагональный рукав	1444 (5,4)	243	2621 (8,2)	333
10	Правый рукав (протока между о-вами Митька-Беляга и Черпальскими)	7473 (28,1)	231	6996 (22)	333
11	Между о. Митька-Беляга и о.Рысий	1484 (5,6)	231	1728 (5,4)	333
12	Между о. Рысий и о. Тисэнгдэ	4719 (17,7)	231	5146 (16,1)	333
13	Единое русло перед Черпальским разветвлением	26 622 (98,5)	231	31 897 (99,9)	333

Продольные рукава посередине реки в верхней части узла (между о-вами Черпальскими, Чарпалар и Уэс-Станаах) маловодны (их водность составляет всего 4,5 и 9,2%). Левый рукав сосредотачивает 31,2 %, но из-за большого количества островов и осередков в нем такое значение водности

достигается лишь в его нижней части (ниже о. Тыатенгелилях). Диагональный (квазипоперечный) рукав, отходящий влево у оголовка о. Бол. Соболиного забирает 14,5% стока, но 12% уходит в продольный рукав в нижней части разветвления (между о-вами Бол. Соболиным и Хара-Ары).

Островами второго порядка (Митька-Беляга и Рысий) правый основной рукав на перевале потока, огибающего прибрежные острова, к правому коренному берегу, разделяется на три протоки, между которыми в многолетнем плане происходит периодическое перераспределение стока (и, как следствие, изменение трассы судового хода).

Протока между о-вами Рысий и Митька-Беляга (створ № 11) посередине правого основного рукава мало изменяет свою водность, практически всегда являясь маловодной (4,5-7,3%) и мелкой. Периодичность в изменении водности левого и правого рукавов возле этих островов совпадает по времени с большим или меньшим отвлечением части стока в диагональный рукав перед о. Бол. Соболиным (створ № 3) и из него в субпараллельную Лавровую протоку (створ № 4). В годы, когда возрастает водность протоки справа от о. Рысьего (вдоль правого коренного берега – створ № 12), заход в диагональный рукав мелеет, доля стока в нем сокращается в 2-2,5 раза. Эти колебания водности рукавов и периодическое их развитие связаны со смещением кос и отмелей в устье правобережных о-вов Тисэнгдэ и Тирэх, которые перекрывают заход в правый рукав у о. Рысьего, превращая его в длинную затонину вдоль правого коренного берега, и последующим их отторжением, благодаря чему поток вновь перемещается в правую протоку у о. Рысьего. Одновременно с этим на заходе в диагональный рукав и протку слева от о. Митька-Беляга надвигается массивный побочень, смещающийся вдоль верхней части центральной группы островов, перекрывая и способствуя их обмелению. Такие переформирования во второй половине XX века происходили каждые 10-12 лет, но, начиная с 1990-х годов до настоящего времени цикл, продолжается в среднем 7-9 лет. В развитии диагонального рукава эта периодичность сказывается в колебаниях водности правого основного рукава в пределах от 36,1% (1993 г.) – 51,6% (1974 г.); в 2021 г. она составляла 42%. Это рассредоточение стока воды в нижней части правого основного рукава на его подходе к правому коренному берегу приводит к формированию здесь перекатов, являющихся одними из самых затруднительных для водного транспорта, требующих проведения регулярных дноуглубительных работ.

В многолетнем плане и в разные фазы водного режима водность субпараллельных рукавов колеблется: в 1971-2020 гг. доля стока в Лавровой протоке изменялась в пределах 11,0-13,1%.

Основным и наиболее важным фактором, определяющим морфодинамику русла в разветвлении *Сахам* также является разделение потока на два основных рукава, в каждом из которых формируются острова и осередки, в свою очередь, разделяющие их на протоки 2-го порядка. Но в отличие от Монастырского и Черпальского разветвлений водность основных рукавов здесь различается почти в 3 раза: левый рукав (створы №№ 10-12) –

17,8%, правый (створы №№ 1,2,3) – 65,5%. Такому перераспределению стока в пользу правого основного рукава способствует направляющее воздействие вогнутости левого берега в Черпальском звене и образование цепочки островов посередине русла, перекрывающих заход в левый рукав в разветвлении Сахам. В результате по все трем звеньям происходит последовательное увеличение водности правых и снижение водности левых рукавов. В правой ветви течения перераспределение расходов воды по рукавам разветвлений второго порядка, смещение и продвижение на заходы в рукава побочной, на фоне сезонных и многолетних колебаний стока реки, как и в Черпальском разветвлении приводят к периодическому изменению положения динамической оси потока (как следствие – трассы судового хода) и такой же периодичности в активизации диагонального рукава у о. Сахам.

Анализ данных измерений расходов воды за различные годы (табл. 3), показывает относительное постоянство рассредоточения стока в диагональном рукаве, на фоне его активизации (в определенные периоды в нем располагался судовый ход, огибающий о. Сахам) и колебаний водности в зависимости от переформирований русла правого основного рукава.

В периоды повышенной водности (конец 1940-х, начало 1970-х, начало 2000-х гг.) доля стока в нем превышала 35% (в половодье достигала 50%), и тогда же увеличивалась водность центрального (субпараллельного) рукава у о. Сахам. В другие годы только при высоких уровнях она составляла не более 30%, а в низкую межень поток разделялся по протокам между осередками (до 3-х), водность каждой из которых – около 7-9%, и лишь суммарная доля расхода воды в диагональном рукаве составляет около 30% (створы №№ 5,6,14), тогда как в начале 70-х гг. она была равна 41%. Соответственно увеличилась доля стока в правом рукаве – 40% в 2021 г. против 32% в 1974 и 1994 гг. Правый рукав (в нижней части звена) у о. Сахам, подобно правому рукаву в Черпальском разветвлении, разделяется на две ветви о. Малым (створы №№ 15,16). В 1989-1995 гг. слева от о. Малого сосредотачивалась большая часть расход воды, но к 2020 г. эта протока обмелела, ее водность составила 4-5%. В это же время протока справа от о. Малого (створ № 16), судоходная с начала 2010-х гг., забирает около 32%.

Сохранению повышенной водности диагонального рукава способствует увеличение доли стока в створе № 3 (до 20%), и в отдельные годы в нем располагался судовый ход, который, огибая затем отмели в устье о. Лэпсэней, направлялся в диагональную (квазипоперечную) протоку. Эти изменения в рассредоточении стока связаны с формированием побочной и кос в верхней части правого основного рукава, в устье правобережных островов Ыт-Халбыт и их периодическом отторжении (аналогично деформациям в Черпальском разветвлении). Повышенной водности правого основного рукава способствует также его расположение вдоль высокого коренного берега. Это же обстоятельство – одна из причин обуславливающая меньшую водность левого рукава. В то же время это способствует формированию поперечного уклона между двумя основными рукавами, что наря-

ду с перестроениями русла в верхней части правого рукава, создает условия для развития диагонального рукава у о. Сахам.

Таблица 3. Измеренные расходы воды в разветвлении Сахам

Створ № (рис. 4)	Рукав, протока	26.06.-11.07.1971 г		03.07.2021 г.	
		Q, м ³ /с (%)	Срезка, см	Q, м ³ /с (%)	Срезка, см
1	Прибрежная протока за безымянным островом	440 (0,7)	512	863 (2,5)	353
2	Правый (судоходный) основной рукав	19 010 (28,1)	498	15757 (45,1)	353
3	Левая протока перед заходом в диагональный рукав между безымянным островом и о. Бол. Лэпсэней	8060 (11,9)	498	6599 (18,9)	353
4	Субпараллельный рукав между о-вами Бол. и Мал. Лэпсэней	2290 (3,4)	471	1014 (2,9)	353
5	Квазипоперечный между о-вами. Сахам и Лэпсэней (левая протока)	17250 (25,3)	544	7130 (20,4)	353
6	Диагональный рукав между о-вами. Сахам и Лэпсэней (центральная протока)			1067 (3)	353
7	Диагональный рукав между о-вами. Сахам и Лэпсэней (левая протока)	–	–	6672 (19,1)	353
8	Субпараллельный рукав между о-вами Хонгкуя и Лэпсэней	3170 (4,6)	547	2735 (7,8)	353
9	Межостровная протока слева от о. Хонгкуя	–	–	319 (0,9)	353
10	Правая протока в левом основном рукаве	–	–	1039 (3)	353
11	Центральная протока в левом основном рукаве	–	–	810 (2,3)	353
12	Левая протока в левом основном рукаве	26410 (38,8)	565	5424 (15,5)	353
13	Диагональный рукав между о-вами Сахам и Хонгкуя	19270 (28,3)	547	13264 (38)	353
14	Диагональный рукав (правая протока вдоль о. Сахам)	–	–	3089 (8,8)	353
15	Правый основной рукав (протока между о-вами Сахам и о. Малым)	21560 (31,7)	547	1775 (5)	353
16	Правый судоходный рукав (протока между о. Малый и правым берегом)			12291 (35)	353

Внутригодовые колебания стока в рассредоточении расходов по рукавам в разветвлении Сахам сказываются незначительно: относительная водность правого рукава в его верхней части по мере спада половодья (снижение уровней более 3 м) сокращается всего с 31,8% до 28,8%.

ЛИТЕРАТУРА

Беркович К.М., Борсук О.А., Гаррисон Л.М., Кирик О.М., Лодина Р.В., Рулева С.Н., Чалов Р.С., Чернов А.В. Руслевой режим и регулирование русла средней и нижней Лены // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1981. Вып. 8. С. 125-156.

Водные пути бассейна Лены. М.: МИКИС, 1995. 600 с.

Маккаев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 348 с.

Русловой режим средней и нижней Лены. М.: Деп. ВИНТИ № 2224-76, 1976. 184 с.

Чалов Р.С. Географические исследования русловых процессов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 232 с.

Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 2. Морфодинамика речных русел. М.: КРАСАНД, 2011. 960 с.

Чалов Р.С., Беркович К.М., Рулева С.Н., Завадский А.С., Головлев П.П., Голубцов Г.Б. Формирование, эволюция и временная трансформация параллельно-рукавных разветвлений речных русел // Географический вестник. 2020, № 4 (55). С. 110-125.

Чалов Р.С., Завадский А.С., Рулева С.Н. Параллельно-рукавные разветвления речных русел; условия формирования, морфология и динамика // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. №2. С. 166-174.

Чалов Р.С., Кирик О.М. Ленские “разбои”: ретроспективный анализ переформирования, прогнозные оценки и регулирование русла // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Геогр. ф-т. МГУ. 2015. Вып. 19. С. 294-333.

М.М. Иванов, к.г.н., старший научный сотрудник
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В БАССЕЙНАХ РЕК, ПОДВЕРГШИХСЯ ИНТЕНСИВНОМУ ЧЕРНОБЫЛЬСКОМУ ЗАГРЯЗНЕНИЮ, НА ПРИМЕРЕ р. УПЫ*
(научный руководитель – д.г.н., в.н.с. В.Н. Голосов)

Балансовый подход при изучении формирования стока наносов является эффективным, но довольно трудозатратным методом. Недостаток или полное отсутствие мониторинговых данных приводит к тому, что балансовый метод часто является единственным способом оценить объёмы и определить источники потоков наносов в речных бассейнах со значимым антропогенным воздействием.

Долгосрочный прогноз трансформации загрязнения невозможен без подробного изучения механизмов и путей латеральной миграции радионуклидов в составе стока наносов [Golosov V.N. et al, 1999; Golosov V et al, 2020; Konoplev A et al, 2016; Panin A.V. et al, 2001, Walling D.E., 2003]. Следовательно, масс-балансовая оценка миграции загрязнителей, ассоциированных с наносами, является той задачей, для решения которой определение баланса наносов является вполне подходящим инструментом.

* Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккаеева МГУ имени М.В. Ломоносова

Интенсивное радиоактивное загрязнение речных бассейнов в значительной мере актуализирует данный подход. Крупные радиационные аварии такие, как Чернобыльская или Фукусимская катастрофы, является, с одной стороны, серьёзным экологическим вызовом [Beresford N. A. et al, 2016], а с другой открывает широкие методические перспективы комплексных исследований эрозии и аккумуляции наносов, где ^{137}Cs , включая глобальных выпадения после бомбовых испытаний, выступает одновременно как объект изучения и как удобный трассер.

На территории современной России наиболее детальные исследования перераспределения наносов и миграции, связанного с ними ^{137}Cs осуществлялись на протяжении более 25 лет в бассейне р. Упы. В последнее десятилетие работы в бассейне р. Упы проводилась параллельно с исследованиями в зоне Фукусимского загрязнения. В качестве одной из целей данных проектов было сопоставление трансформации радиоактивного загрязнения в контрастных ландшафтно-климатических условиях.

Бассейн р. Упы площадью около 9500 км² расположен в северной части Среднерусской возвышенности в пределах Тульской области. По классификации Коппена-Гейгера эта территория относится к зоне Dfb, для которой характерен холодный климат без сухого сезона с теплым летом [Голосов В.Н. и др., 2021]. Годовой слой осадков уменьшается с северо-запада на юго-восток с 630 до 592 мм, причём в тёплое время года в среднем выпадает порядка 460 мм жидких осадков. Почвенный покров в пределах междуречных пространств представлен выщелоченными и оподзоленными чернозёмами, а также тёмно-серыми лесными почвами. Почвообразующей породой являются карбонатные лессовидные суглинки [Ратников А.И., 1960]. Характерной чертой территории являются плоские приводораздельные поверхности, занимающие наибольшие площади в верховьях рек. Склоны междуречий преимущественно пологие, выпуклые, длина их может достигать до нескольких сотен метров. Большая по площади южная часть бассейна с высокой долей распахиваемых территорий в земельном фонде была сильно загрязнена после аварии на ЧАЭС в апреле 1986 г. Максимум радиоактивного загрязнения отмечается в центральной части бассейна р. Плавы, левого притока р. Упы, и протягивается сравнительно узкой полосой к востоку и западу, образуя так называемое «Плавское радиоактивное пятно». Замыкающим створом для верхней части бассейна р. Упы служит Щёкинское водохранилище, которое было создано в конце 1940-х г. для нужд Щёкинской ГРЭС (рис. 1).

Были исследованы пять ключевых малых водосборов, располагающихся в центральной и южной частях бассейна р. Плавы. Основой целью работ было исследование путей перераспределения наносов и связанных с этим изменений запасов ^{137}Cs на разных геоморфологических позициях в течение первых десятилетий после Чернобыльской катастрофы.

Исследованиями в середине 1990-х гг. было установлено, что 11 лет, прошедших после выпадения ^{137}Cs Чернобыльского происхождения, оказалось слишком мало для существенных потерь запасов радионуклидов

на обрабатываемых склонах, обусловленных смывом почвы. Но был зафиксирован только рост запасов ^{137}Cs на локальных участках аккумуляции наносов [Golosov V.N., Panin A.V., Markelov M.V., 1999]. Системы ложбин на обрабатываемых склонах являются важнейшим путём транспорта наносов в балочную сеть [Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N., 2001].

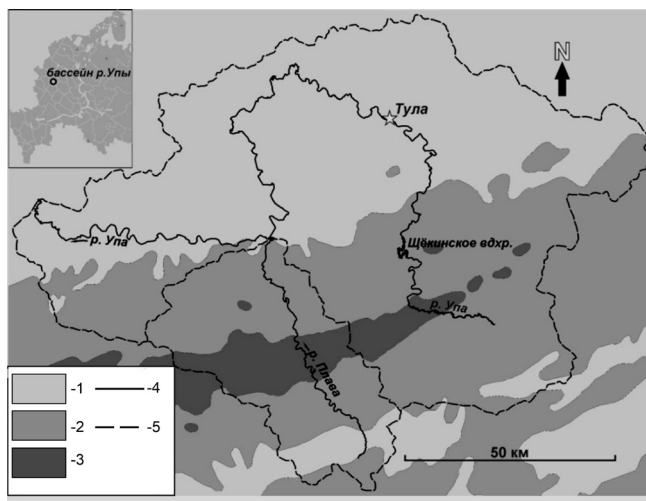


Рис. 1. Расположение бассейнов р. Упы и его уровень радиоактивного загрязнения.
Плотность загрязнения ^{137}Cs кБк/м²: 1 – >37, 2 – 37-185, 3 – 185-555, 4 – реки, 5 – границы водосборов

Совместное использование радиоцезиевого метода и магнитного трассера выявило отчётливый тренд к снижению темпов эрозии за пост-Чернобыльский период в сравнении со 150-летним периодом активной распашки. Основными причинами снижения является сокращение интенсивности талого стока на склонах в весеннее время и уменьшение доли пропашных культур в севообороте [Golosov V. N. et al, 2011]. Доставка наносов и ^{137}Cs за пределы распаиваемых склонов определяется не только уклоном и формой склона, но и в значительной мере антропогенными элементами рельефа, в том числе напашами по границам полей. Напаша является не только механическим препятствием для наносов, но и важным геохимическим барьером на пути миграции радионуклидов [Zhidkin A.P. et al, 2020].

Днища сухих долин являются основными накопителями наносов, выносимых с распаиваемых склонов [Иванов М.М., Голосов В.Н., Беляев В.Р., 2017; Gusarov A.V. et al, 2019]. При этом интенсивность переотложения наносов зависит главным образом от уклона днища [Golosov, V.N., Panin, A.V., Walling, D.E., 2000]. Согласно оценке, произведённой для бассейна р. Плавы на период 1986-2009 гг., около 60% наносов, смытых с обра-

батываемых склонов в бассейне р. Плавы, не покидает пределы водосборов 1-3-го Хортон-порядка [Belyaev et al., 2012]. Доля наносов, выносимых за пределы водосборов долин 4 Хортон порядка, как правило, не превышает 10% от общего объёма смытых с пашни наносов [Голосов В.Н., 2006; Фридман Ш.Д. и др., 1997; Golosov V., 2006]. Т.о. основным источником поступления материала в речные долины бассейна р. Плавы являются водосборы непосредственно впадающих в них малых долин 1-2 порядка.

Исследования пойменных комплексов рек Локны, Плавы и Упы показали высокую пространственную неоднородность накопления наносов и радионуклидов. Наблюдается чёткое различие между темпами аккумуляции на различных уровнях поймы р. Локны. На низкой пойме, где темпы аккумуляции составили 0,3-1,1 см/год, за счёт накопления загрязнённых наносов суммарные запасы ^{137}Cs даже с учётом потерь от радиоактивного распада не уменьшились. На средней пойме аккумуляция за пост Чернобыльский период очень низкая в силу сокращения талого стока со склонов, и, как следствие, снижения случаев её затопления в периоды формирования весеннего половодья [Мамихин С.В. и др., 2016]. Интенсивное накопление все менее загрязненного материала на низкой пойме р. Локны приводит к снижению мощности формируемой дозы и позитивным радиэкологическим эффектам [Иванов М.М. и др., 2021]. Схожая картина наблюдается также и на пойме р. Плавы, где наиболее активно трансформация исходного поля загрязнения происходит на низкой пойме [Иванова Н.Н. и др., 2014]. Средние темпы аккумуляции здесь несколько выше и на низкой пойме составляют 0,7–1,4 см/год [Belyaev V.R. et al, 2013].

Средняя и низкая пойма р. Упы, на участке ниже по течению от впадения р. Плавы присутствует в днище долины фрагментарно. Вследствие относительно их небольшой площади здесь откладывается только незначительная часть переносимых р. Упой наносов. Но темпы накопления в период 1986-2014 гг. при малой площади поверхности пойменных сегментов достигали 1,5–2,7 см/год. Был выявлен тренд снижения объёма половодного стока р. Упа, особенно ярко выраженный после 2007 г., обусловленный сокращением доли поверхностного стока со склонов и переходом его в подземный сток. В результате произошло сокращение бассейновой составляющей в стоке наносов рр. Упа и Плава, что привело в этот период к снижению воздействия стока р. Плава на загрязнение р. Упа [Голосов В.Н. и др., 2021].

Как было отмечено ранее, проведение балансовых исследований, в частности с применением Чернобыльского ^{137}Cs , скорее всего, будет связано со следующими направлениями [Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V., 2013]:

– изучением перераспределения наносов на обрабатываемых склонах путём комбинированного использованием радиоцезиевого метода с моделями эрозии, дистанционным зондированием и анализом имеющихся метеорологических данных, в особенности для единичных экстремальных эрозионных событий.

– построением балансов наносов для временных отрезков, выходящих за пределы пост Чернобыльского периода, с привлечением методов оценки интенсивности эрозионно-аккумулятивных процессов различного временного разрешения [Golosov V., Belyaev V., Kuznetsova Y., Markelov M., Shamshurina E., 2008]

– оценкой эффективности почвозащитных мер

– мониторинговыми исследованиями в бассейнах малых типичных рек, подвергшихся интенсивному радиоактивному загрязнению, где изменения в интенсивности пойменного осадконакопления могут продемонстрировать влияние климатических флуктуаций и изменения в системе землепользования на функционирование речных бассейнов

– детальным изучением латеральной миграции ^{137}Cs в пределах обрабатываемых водосборов, как аналога перераспределения других поллютантов, ассоциированных с наносами [Golosov V.N., 2002]

– проведением исследований водосборов искусственных водоёмов, где баланс наносов может быть практически полностью инструментально оценён, поскольку практически весь формируемый сток наносов задерживается в устьевом створе таких водосборов [Голосов В.Н. и др., 2021; Belyaev V.R. et al, 2013; Gusarov A.V. et al, 2019]

– исследование донных осадков, выступающих в виде природного архива, позволяет отчасти компенсировать недостаток стационарных наблюдений миграции наносов и вмещённых в них загрязнителей в бассейнах малых рек [Иванов М.М. и др., 2019; Ivanov M.M. et al, 2021; Konoplev A.V. et al, 2019].

ЛИТЕРАТУРА

Голосов В.Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в речных бассейнах освоенных равнин. М.: ГЕОС, 2006. 296 с.

Голосов В.Н., Куксина Л.В., Иванов М.М., Фролова Н.Л., Иванова Н.Н., Беляев, В.Р. Оценка перераспределения ^{137}Cs в пойменных отложениях реки Упа (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Изв. РАН. Сер. географ.. 2020. №1. С. 114-126.

Голосов В.Н., Иванов М.М., Цыпленков А.С., Иванов М.А., Вакияма Ю., Коноплев А.В., Константинов Е.А., Иванова Н.Н. Эрозия как фактор трансформации радиоактивного загрязнения почв на водосборе Щекинского водохранилища (Тульская область) // Почвоведение. 2021. №2. С. 247-260.

Иванов М.М., Голосов В.Н., Беляев В.Р. Анализ строения рельефа для оценки коэффициента доставки наносов бассейна реки Плавы (Тульская область) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2017. № 3. С. 14-23.

Иванов М.М., Гуринов А.Л., Иванова Н.Н., Коноплев А.В., Константинов Е.А., Кузьменкова Н.В., Терская Е.В., Голосов В. Н. Динамика накопления ^{137}Cs в донных осадках Щёкинского водохранилища за постчернобыльский период // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. № 6. С. 656-668.

Иванов М.М., Комиссарова О.Л., Кошовский Т.С., Цыпленков А.С. Применение полевой гамма-спектрометрии и дозиметрии для исследования осадочнонакопления на пойме малой равнинной реки в зоне интенсивного радиоактивного загрязнения // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 1. С. 120-127.

Иванова Н.Н., Шамигурина Е.Н., Голосов В.Н., Беляев В.Р., Маркелов М.В., Парамонова Т.А., Эврар О. Оценка перераспределения ¹³⁷Cs экзогенными процессами в днище долины р. Плава (Тульская область) после аварии на Чернобыльской АЭС // Вест. Моск. ун-та. Се. 5. География. 2014. № 1. С. 24-34.

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

Ратников А.И. Геоморфологические и агропочвенные районы Тульской области / «Почвенное районирование СССР» – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. – С. 92-115

Фридман Ш.Д., Квасникова Е.В., Глушко О.В., Голосов В.Н., Иванова Н.Н. Миграция цезия-137 в сопряженных геоконплексах Среднерусской возвышенности // Метеорология и гидрология. 1997. № 5. С. 45-55.

Belyaev V.R., Golosov V.N., Kuznetsova J.S., Markelov M.V. Quantitative assessment of effectiveness of soil conservation measures using a combination of ¹³⁷Cs radioactive tracer and conventional techniques // Catena. 2009. Vol. 79. P. 214-227.

Belyaev V.R., Shamshurina E.N., Markelov M.V., Golosov V.N., Ivanova N.N., Bondarev V.P., Paramonova T.A., Evrard O., Lio Soon Shun N., Otle C., Lefevre I., Bonte P. Quantification of river basin sediment budget based on reconstruction of the post-Chernobyl particle-bound ¹³⁷Cs redistribution // Erosion and sediment yields in the changing environment (proceedings of a symposium held in Chengdu, China, Oct, 2012). 2012. IAHS Publ. 356. IAHS Press, Wallingford. P. 394-403

Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., Ivanova N.N., Shamshurina E.N., Evrard O. Effects of landuse and climate changes on small reservoir siltation in the agricultural belt of European Russia // Considering hydrological change in reservoir planning and management, proceeding of H09. 2013a. IAHS-IAPSO-IASPEI assembly, Gothenburg, Sweden, Jul 2013. P. 134-145

Belyaev V.R., Golosov V.N., Markelov M.V., Evrard O., Ivanova N.N., Paramonova T.A., Shamshurina E.N. Using Chernobyl-derived ¹³⁷Cs to document recent sediment deposition rates on the River Plava floodplain // Hydrological Processes. 2013b. № 6. P. 807-821

Beresford N. A., Fesenko S., Konoplev A., Skuterud L., Smith, J. T., Voigt, G. Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt? // Journal of environmental radioactivity. 2016. Vol. 157. P. 77-89.

Golosov V.N., Walling D.E., Panin A.V., Stukin E.D., Kvasnikova E. V., Ivanova N.N. 1999a. The spatial variability of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs invento-

ries in a small agricultural drainage basin in central Russia // *Applied Radiation and Isotopes*. 1999a. № 4. P. 341-352.

Golosov V.N., Panin A.V., Markelov M.V. Chernobyl ¹³⁷Cs redistribution in the small basin of the Lokna river, Central Russia // *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*. 1999b. № 10. P. 881-885.

Golosov, V.N., Panin, A.V., Walling, D.E. Post-fallout redistribution of Chernobyl-derived Cs-137 in small catchments within the Lokna river basin // The role of erosion and sediment transport in nutrient and contaminant transfer. Canada, Waterloo, July. 2000. P. 10-14.

Golosov V.N. Special considerations for areas affected by chernobyl fallout / Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. — Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 2002. — P. 165-183.

Golosov V. Influence of different factors on the sediment yield of the Oka basin rivers (central Russia) // IAHS PUBLICATION. 2006. Vol. 306. P. 28–36

Golosov V., Belyaev V., Kuznetsova Y., Markelov M., Shamshurina E. Response of a small arable catchment sediment budget to introduction of soil conservation measures // *Sediment Dynamics in Changing Environments*, IAHS Publ. 2008. Vol. 325, IAHS Press: Wallingford, UK. P. 106-113.

Golosov V. N., Gennadiev A. N., Olson K. R., Markelov M. V., Zhidkin A. P., Chendev Yu G., and Kovach R. G. Spatial and temporal features of soil erosion in the forest-steppe zone of the East-European Plain // *Eurasian Soil Science*. 2011. № 7. P. 794-801

Golosov V.N., Belyaev V.R., Markelov M.V. Application of chernobyl-derived ¹³⁷Cs fallout for sediment redistribution studies: lessons from European Russia // *Hydrological processes*. 2013. № 6. P. 781-794

Golosov V., Ivanov M. Chapter 4 quantitative assessment of lateral migration of the chernobyl-derived ¹³⁷Cs in contaminated territories of the East-European Plain / *Behavior of Radionuclides in the Environment II Chernobyl*, Springer, 2020. Singapore P. 195-226

Gusarov A.V., Golosov V.N., Ivanov M.M., Sharifullin A.G. Influence of relief characteristics and landscape connectivity on sediment redistribution in small agricultural catchments in the forest-steppe landscape zone of the Russian Plain within European Russia // *Geomorphology*. 2019. Vol. 327. P. 230-247.

Ivanov M.M., Konoplev A.V., Walling D.E., Konstantinov E.A., Gurinov A.L., Ivanova N.N., Kuzmenkova N.V., Tsyplenkov A.S., Ivanov M.A., Golosov V. N. Using reservoir sediment deposits to determine the longer-term fate of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs fallout in the fluvial system // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 274. 116588

Konoplev A., Golosov V., Laptev G., Nanba K., Onda Y., Takase T., Wakiyama Y., Yoshimura K. Behavior of accidentally released radiocesium in soil–water environment: Looking at Fukushima from a Chernobyl perspective // *Journal of environmental radioactivity*. 2016. Vol. 151. P. 568-578.

Konoplev A.V., Ivanov M.M., Golosov, V. N., Konstantinov, E. A. Reconstruction of long-term dynamics of Chernobyl-derived ¹³⁷Cs in the Upa River using bottom sediments in the Scheckino reservoir and semi-empirical modelling

// Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2019. Vol. 381. P. 95-99.

Panin A.V., Walling D.E., Golosov V.N. The role of soil erosion and fluvial processes in the post-fallout redistribution of Chernobyl-derived caesium-137: a case study of the Lapki catchment, Central Russia // *Geomorphology*. 2001. Vol. 40. P. 185-204.

Walling D.E. Using environmental radionuclides as tracers in sediment budget investigations // *IAHS Publication*. 2003. P. 57-78.

Zhidkin A.P., Shamshurina E.N., Golosov V.N., Komissarov M.A., Ivanova N.N., Ivanov M.M. Detailed study of post-Chernobyl Cs-137 redistribution in the soils of a small agricultural catchment (Tula region, Russia) // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 223, 106386.

А.А. Ильина, аспирант

В.Н. Ильин, к.г.н., доцент

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

ДОЛИНЫ РЕК г. ЧЕБОКСАРЫ: ВОЗМОЖНОСТИ И РИСКИ ПРИ СТРОИТЕЛЬНОМ ОСВОЕНИИ ТЕРРИТОРИИ

(научный руководитель – к.г.н., доц. И.В. Никонова)

Чувашская Республика расположена на востоке Русской равнины, главным образом в правобережье р. Волги – между ее притоками Сурой и Свиягой. На севере рельеф более расчлененный, на юге – пологоволнистая равнина [Чувашская Республика: краткий обзор, 2022]. Расчлененный рельеф обусловил густую гидрографическую сеть. Не отрицая значения крупных рек, Волги и Суры, для региона огромное значение имеют малые реки. Количество их достигает до 2356, а протяженность составляет до 8,6 тыс.км. Все они относятся к Волжскому бассейну. Наибольшая их часть (93,1%) имеет длину менее 10 км, то есть относятся к мельчайшим. Рек длиной 10-25 км имеется 119 (5%), от 26 до 100 км – 37 (1,6 %), от 101 до 500 км -5 (0,2%) и более 500 км – 2 (0,1%).

Наиболее значимыми из малых рек в республике являются Бездна, Киря, Меня, Выла, Унга, Аниш, Кукшум, Ута, Аль, Рыкша. Население пользуется водой рек как источник орошения, водопоя скота и для других нужд. Малые реки привлекают население как места отдыха и рыбалки.

Густота речной сети республики составляет 0,48 км/км². Наиболее высокие значения густоты речной сети (до 1,2 км/км²) приурочены к возвышенной северной части Чувашии (так называемое Чувашское плато), которая отличается сложным геолого-тектоническим строением с развитой микроскладчатостью и многочисленными водоносными горизонтами [Общая информация о водных объектах Чувашской Республики, 2022].

Весьма актуальным является вопрос состояния вод в малых реках, так как практически все населенные пункты республики расположены вдоль

них. Следует отметить, что характерной особенностью малых рек является их более низкая, по сравнению с большими и средними реками, способность к самоочищению вследствие низкой водности, в результате чего на этих реках значительно чаще, чем на крупных, формируются участки хронического загрязнения, а гидрохимический режим более ярко отражает особенности географического положения водосбора. Поэтому здесь тенденции выражены ярче и, как правило, более значимы, чем на крупных реках.

Наибольшую антропогенную нагрузку испытывают реки, расположенные в столице республики – городе Чебоксары и прилегающих территориях. Долины рек г. Чебоксары имеют особый охранный статус, о чем свидетельствует карта ограниченного использования земель. В ходе проведённого ландшафтно-визуального и картографического анализа можно сказать, что применяются недостаточные меры по сохранению малых рек и их долин. В пользу этого говорит и отсутствие, по данным Публичной кадастровой карты Росреестра, водоохраных зон рек Чебоксарки, Трусихи, Сугутки, Кукшум и Шупашкарки.

Непосредственно на территории города в р. Волгу (Чебоксарское водохранилище) и малые реки сбрасывают стоки 14 предприятий, из которых 4 - производственные, и 10 - ливневые с промышленных территорий.

Плодородный слой почвы ежегодно смывается паводковыми водами, увеличивается антропогенная нагрузка, не урегулирован сток ливневых вод. Источниками загрязнения являются промышленные и многочисленные малые предприятия по ремонту, мойке автомашин, районы новостроек, которые появились за последние 20 лет. Только отдельные крупные предприятия (ОАО «Контур», ОАО «Завод им. В.И. Чапаева» и т.д.) имеют примитивные локальные очистные сооружения по очистке твёрдого стока и нефтепродуктов, зачастую не всегда эффективные.

Очень много в воде взвешенных частиц (песок, глина, почва). В аккумулирующую ёмкость ежегодно поступает около 7000 м³ ила и иловатых грунтов. Основные источники поступления твёрдого стока – это несанкционированные свалки рыхлого грунта в районах новостроек.

Наблюдения за качеством воды в Чебоксарском водохранилище, рек Чебоксарка, Трусиха, Сугутка, Травянка показали, что качество воды в Чебоксарском водохранилище относится, в основном, к 3 классу умеренно загрязнённых вод (ИЗВ – 1,98), лишь в пункте ниже г. Чебоксары вода относится к 4 классу – загрязнённые воды (ИЗВ – 3,34), в чем основную роль играет неудовлетворительное состояние системы очистки ливневых вод города. Воды малых рек относятся к 5 и 6-му классам – грязные и очень грязные.

Параллельно с промышленным и бытовыми загрязнениями в долинах рек г. Чебоксары наблюдается активная застройка этих земель новыми микрорайонами. К сожалению, это связано с дефицитом городских земельных ресурсов, что привело к вовлечению в оборот мест не очень удобных для строительства: это прирбовочные части склонов малых рек, а также коренной склон р. Волги (рис. 1).

Долины малых рек г. Чебоксары занимают 2588,97 га. Значительная их часть активно используется в хозяйственной деятельности.

Под существующими и подготовленными к многоэтажной застройке землями находится 219,54 га площади долин рек (8%). 798 га долин заняты под коттеджными домами, садовыми товариществами и гаражными кооперативами (30,8%). Оставшиеся участки долины характеризуются природными или природно-антропогенными землями, относящимися к зоне рекреации. Примечательно, что площадь новых (не более 10 лет) застраиваемых многоэтажками участков, больше уже существующих в 2 раза (149 га против 70 га).

В ходе анализа степени загрязненности, степени и доли хозяйственной освоенности, долины малых рек в черте г. Чебоксары были разделены на 3 группы:

1) Долины рек, с доминирующей долей, интенсивно используемых под коттеджную и многоэтажную застройку земель. Сюда относятся долины р. Малая Кувшинка, р. Чебоксарка, р. Кайбулка. Большая часть многоэтажной постройки относится к современной. Доля дачных и коттеджных участков не менее 50% от площади долин. Долины испытывают критическую антропогенную нагрузку.

2) Долины малых рек, выделяющиеся наличием и многоэтажной застройки, и коттеджной. Доля рекреационной зоны преобладает. Многоэтажная застройка этих долин на современном этапе не значительна. Это реки Кукшум, Шупашкарка, Шалмас. Долины испытывают высокую нагрузку.

3) К третьей группе отнесены долины, на территории которых отсутствует многоэтажная застройка, промышленные объекты и гаражные кооперативы. Доля садовых товариществ незначительна. Это река Трусиха и безымянные реки северо-восточной части города. Выделяются средней антропогенной нагрузкой.

Долины малых рек г. Чебоксары являются малопригодными для капитального строительства из-за высокого уровня грунтовых вод. Однако, происходит их застройка (заравнивание, засыпка оврагов, канализирование рек) [Экология ..., 2005]. Таким образом, «ушли» под землю реки Кайбулка, Кнутиха и др. В целом для территории города характерна нарушенная естественная дренированность, связанная с закрытостью территории искусственными покрытиями и планировкой территории (засыпкой древних балок и старых оврагов). В ряде мест, где неправильно устроена ливневая канализационная система, периодически наблюдаются грязе-водяные потоки и оплывины после обильного снеготаяния и интенсивных осадков в теплый период года. Такая картина неоднократно наблюдалась в МКР Нового села, МКР Новоюжный. И недавно в мкр. Радужный произошла деформация грунта, спровоцированная обводнением техногенного грунта (рис. 2). Перевод русел в закрытые, "канализированные" формы приводят к изменению водного режима территории за счет неучтенных водотоков и притоков малых рек.

В засыпанных техногенными грунтами оврагах и балках, происходят также просадки грунта. А спрятанные в подземные трубы малые реки и водотоки становятся источниками потенциальной опасности оползневых деформаций.

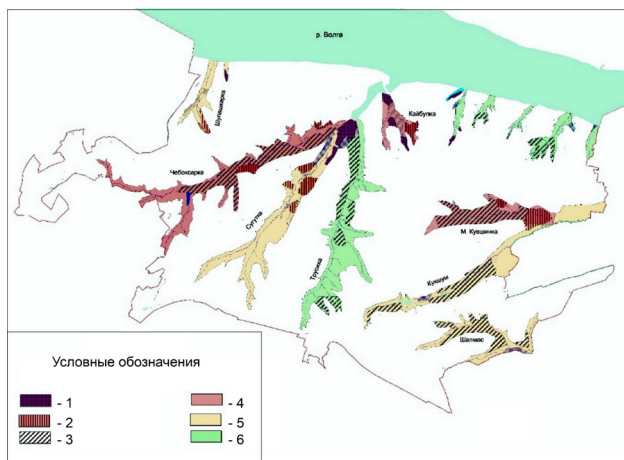


Рис. 1. Карта хозяйственного освоения долин рек г. Чебоксары. Виды хозяйственного освоения: 1 – многоэтажная застройка, 2 – современная многоэтажная застройка, 3 – коттеджи и сады; Уровень хозяйственной освоенности долин: 4 – критический, 5 – высокий, 6 – средний



Рис. 2. Деформация грунта в мкр. Радужный г. Чебоксары

Нарушение водного режима и увеличение нагрузки на отдельные части долин малых рек приводят к возникновению чрезвычайных ситуаций – обвалам, осыпям, оползням. Ежегодно на правом берегу Чебоксарского водохранилища (в пределах Чувашской Республики) регистрируется образование от 2 до 6 новых участков оползневых подвижек [Ильин и др., 2016].

На территории г. Чебоксары в долинах малых рек развитие получили локальные оползни в пределах меандр. В породах татарского яруса верхней перми они возникают в тех случаях, когда вершины речных систем или выемки вскрывают элювий этих глин, чаще приуроченных к приводораз-

дельным денудационным склонам (река Трусиха), плиоценовые глины акчагыльской трансгрессии, сохранившихся от денудации в погребенных балках река Чебоксарка [Петров и др., 2014].

Можно сделать вывод о том, что в последние десятилетия наблюдается прогрессирующая застройка наименее устойчивых как в инженерно-геологическом, так и в экологическом плане долин рек в черте г. Чебоксары. Для улучшения устойчивости выделенных объектов и их сохранения нами выдвинут ряд предложений:

1) Начать использовать под строительство значительные по площади участки с индивидуальной, морально и физически «изношенной» индивидуальной застройкой. В Чебоксарах большую площадь занимает индивидуальная застройка в благоприятных для капитального строительства местах, в т.ч., в престижном «центре» и «северо-западе». Часть территории города представляет пустоши (район западного и восточного косягов Волги).

2) Благоустроить долины малых рек г. Чебоксары для последующего их использования в рекреации. В 2021 году был разработан и вынесен на общественное обсуждение проект по развитию и защите малых рек города Чебоксары «Три реки». Проект посвящен развитию и благоустройству прибрежных территорий рек Сугутка, Трусиха, Чебоксарка. Внедрение проекта предполагало создание единой концепции развития защиты малых рек, раскрытие их рекреационного потенциала. В рамках мастер-плана должны были быть разработаны принципы и рекомендации по развитию всех прибрежных территорий проекта. К сожалению, проект не был реализован по финансовым причинам. Превращение долин малых рек в природно-рекреационные коридоры городского округа связано с их ревитализацией. Это требует больших финансовых вложений, как со стороны муниципалитета, так и от частных инвесторов.

3) Рациональное, экологически-ориентированное освоение и застройка долин малых рек. Предложением возможного освоения территории долин малых рек выступает интересное решение сочетания коммерческой застройки и сохранности непрерывности природно-рекреационных коридоров, сформированных вдоль малых рек, строительство домов-мостов. Возможна малоэтажная ландшафтно-декоративная застройка, сочетающая архитектурно-декоративные элементы зданий для рекреации с природно-антропогенными окультуренными ландшафтами [Казиков и др., 2018].

Таким образом, активизировавшаяся в последние десятилетия проблема нерационального освоения и застройки долин рек г. Чебоксары является очень актуальной. Хозяйственное освоение этих территорий не оправдано с экологической точки зрения: нарушаются и деградируют уникальные для городской черты природные ландшафты. В пользу нерациональности застройки долин говорят и сложные геолого-геоморфологические условия: высокий уровень грунтовых вод, неустойчивые почвогрунты, развитие древних и современных опасных склоновых процессов. Поэтому был предложен ряд мер по научно-обоснованному хозяйственному использованию долин малых рек Чебоксар.

ЛИТЕРАТУРА

Общая информация о водных объектах Чувашской Республики: сайт / Министерство природных ресурсов и экологии Чувашской Республики. Чебоксары. URL: <https://minpriroda.cap.ru/action/activity/vodopoljzovanie/obschaya-informaciya-o-vodnih-objektah-chuvashskoj> (дата обращения 06.04.2022 г.).

Ильин В. Н., Беспалова Л. А., Никонорова И. В., Сушко К. С. Характеристика береговой зоны Чебоксарского водохранилища в пределах Чувашской Республики: типология берегов, оценка устойчивости // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 12-2. С. 395-400.

Казаков Н. А., Еремеева С. С., Караганова Н. Г., Михайлова Е. В. Природно-рекреационный каркас городского округа и долины малых рек (на примере города Чебоксары) // *Успехи современного естествознания*. – 2018. № 7. С. 136-141.

Петров, Н. Ф. Из опыта классификации оползневых систем Чувашской Республики / Н. Ф. Петров, И. В. Никонорова, В. Н. Ильин // *Естественнонаучные исследования в Чувашии*. – 2014. № 1. С. 88-93.

Чувашская Республика: краткий обзор: сайт / *Наследие. Чувашия*. – Чебоксары. URL: <http://nasledie.nbchr.ru/etnos/chuvashiya/> (дата обращения 06.04.2022 г.)

Экология фундаментальная и прикладная. Проблемы урбанизации. Мат-лы междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Уральский гос. университет им. А.М. Горького, 2005. 413 с.

А.А. Камышев, м.н.с.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

АПРОБАЦИЯ КРИТЕРИЯ КВАЗИОДНОРОДНОСТИ ПОТОКА И.Ф. КАРАСЕВА К РУСЛАМ КРУПНЕЙШИХ РЕК (на примере Оби и Лены)*

(научный руководитель – д.г.н., проф. Р.С. Чалов)

При анализе гидравлики потока и морфологической структуры русел Особого внимание заслуживает критерий квазиоднородности кинематической структуры потока Θ , который предложил И. Ф. Карасев [1975]:

$$\Theta = \frac{b_p}{h} \sqrt{\frac{2g}{c^2}}$$

где b_p – ширина русла, h – глубина русла, g – ускорение свободного падения, c – коэффициент Шези.

* Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РНФ (проект 18-17-00086 П)

Предложенный Карасевым коэффициент Θ , основывается на различиях в структуре и динамике потока, обусловленных разницей в форме поперечного сечения русла и отличиях в шероховатости. Соотношение b_p к h называется полнотой поперечного сечения, ее численное значение также определяет особенности развития поперечной циркуляции. В изгибах русла, где отношение b_p к h близко к единице, образуется винтообразное течение. В руслах, где отношение b_p к h много больше единицы, наблюдается расхождение направлений донных и поверхностных струй или же разделение потока на две и более динамические оси. В результате формируются осередковые или островные разветвления, определяющие сложность русла. На основе лабораторных опытов Карасев установил, что при значениях критерия больше 9,5 в потоке формируется 2 или более динамической оси, между ними наблюдаются зоны с замедленным течением, способствующим к отложению наносов и формированию разветвленности.

При этом исследований по расчету величины критерия Карасева для крупнейших рек не производилось.

Определение критерия И.Ф. Карасева осуществлялось на морфологически однородных участках рек, соответствующих тем или иным морфодинамическим типам русла. Река Лена рассматривалась в пределах всего широкопойменного русла; Обь до участка раздвоенного русла (до с. Перегребного). Определение величин, входящих в критерий Карасева, производилось по лоцманским и данным руслых съемок, для этого определялись значения ширины и средней глубины русла в характерных створах, назначенных по нормали к оси потока. К основным задачам определения численных значений критерия Карасева относятся:

- поиск связи между данным критерием и сложностью разветвлений;
- проверка на реальных реках критических значений критерия, полученных в лабораторных условиях;
- установление причин преобладания процесса меандрирования на средней и нижней Оби;
- определения характерных значений параметра для различных типов русла.

Дифференциация точек по типам русла представлена на рисунках 1 и 2.

Наибольшее значение критерия соответствуют параллельно-рукавным разветвлениям – 72, для которых свойственна наибольшая сложность конфигурации русла и минимальная устойчивость русла. Высокие значения характерны для односторонних и одиночных разветвлений – 56 и 53 соответственно. Для остальных типов русла значения критерия значительно ниже: 31 для пойменно-руслых разветвлений, 24 для прорванных излучин, 20 для прямолинейного русла, 14 для вписанных излучин и 12 для свободных излучин. Таким образом, можно утверждать, что происходит четкая дифференциация русла по данному показателю на разветвленное и остальные типы [Камышев, 2018].

Сравнение полученных с приведенными автором показателя И.Ф. Карасевым граничным значением (9,5, то есть наличие нескольких динамических осей потока) позволяет утверждать, что на крупнейших реках формирование русел всех типов происходит при значениях критерия,кратно больших. При этом диапазон критерия только для излучин варьирует от 2,93 до 40,7, однако высокие значение параметра характерны только у 5 излучин, на которых имеются вторичные разветвления и осередки.

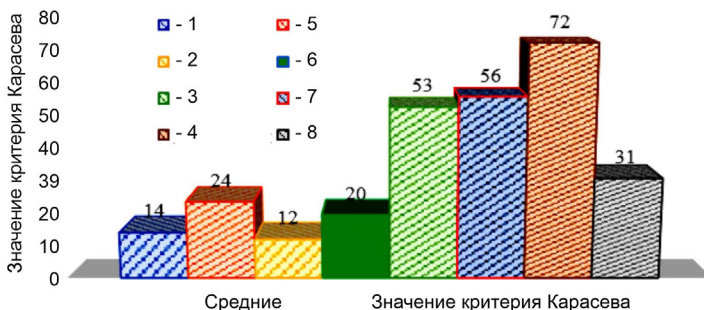


Рис. 1. Средние значения критерия Карасева для различных типов русла р. Оби.

1 – вписанные излучины, 2 – свободные излучины, 3 – одиночные разветвления, 4 – параллельно-рукавные разветвления, 5 – прорванные излучины, 6 – прямолинейное русло, 7 – односторонние разветвления, 8 – пойменно-русловые разветвления

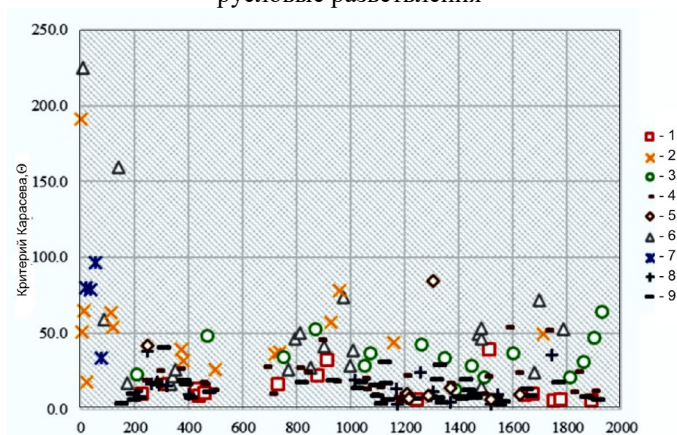


Рис. 2. Динамика критерия Карасева по длине р. Оби

1 – вписанные излучины, 2 – односторонние разветвления, 3 – пойменно-русловые разветвления, 4 – прямолинейное русло, 5 – спрямляющие протоки, 6 – одиночные разветвления, 7 – параллельно-рукавные разветвления, 8 – прорванные излучины, 9 – свободные излучины

На реке Лене наблюдается тренд на увеличение значений критерия Карасева для участков разветвлённого русла вниз по течению вплоть до Черпальского разбоя, затем значения сокращаются (рис. 3). Что хорошо соотносится со сложностью разветвлений с высокой степенью корреляции, значение коэффициента которой составляет 0,83 (рис. 4).

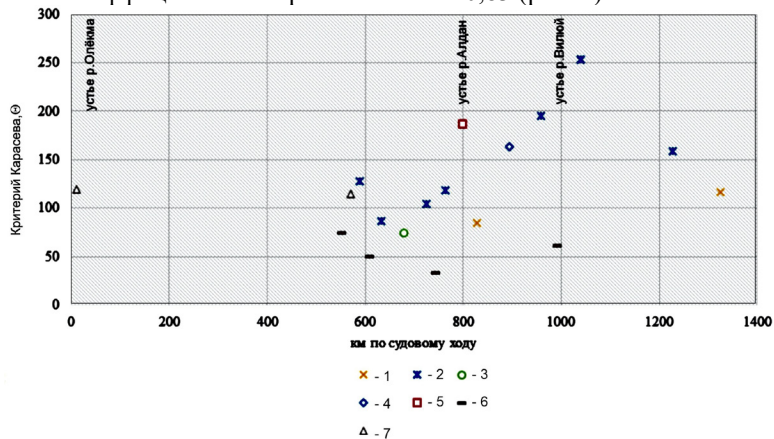


Рис. 3. Значения критерия И.Ф. Карасева на р. Лене.

1 – односторонние разветвлениями, 2 – параллельно-рукавные разветвления, 3 – чередующиеся односторонние, 4 – пойменно-русловые, 5 – дельтовое, 6 – прямолинейное, одиночное

Наибольшие значения критерия Карасева характерны для параллельно-рукавного русла (в среднем – 149, максимум 195). Минимальные значения критерия наблюдаются на относительно прямолинейных участках (от 33 до 75).



Рис. 4. Связь критерия Карасева со сложностью разветвлений

Сравнение усредненных значений критерия Карасева на реках Обь и Лена (рис. 5) показало, что для Лены свойственны гораздо большие значения.

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ КРИТЕРИЯ КАРАСЁВА

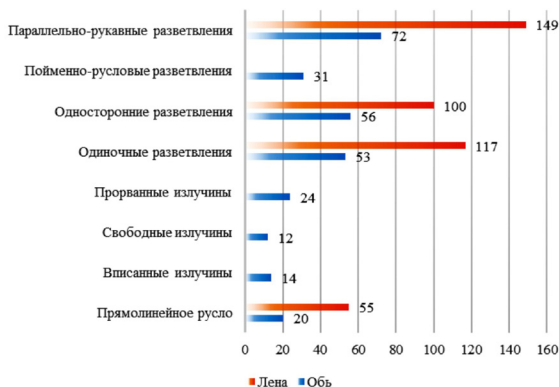


Рис. 5. Сравнение значений критерия И.Ф. Карасева на р. Лене и р. Оби

Таким образом, величина критерия Карасева четко дифференцируется по типам русла, и позволяют оценивать тенденции изменения русла при изменении его морфологических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

Камышев А. А. Особенности морфодинамики русла верхней и средней Оби и ее связь с критерием квазиоднородности потока // Тридцать третья Межвуз. пленар. совещ. по пробл. эрозионных, русловых и устьевых процессов. Докл. и краткие сообщения. Нижневартовск: НВГПУ, 2018. С. 114-116.

Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.

Е.А. Крастынь, студентка

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОЦЕНКА СТОКА РЕЧНЫХ НАНОСОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПЛЕРОВСКИХ ПРОФИЛОГРАФОВ*

(*научный руководитель - д.г.н., доцент С.Р. Чалов*)

Сток наносов – один из сложнейших для измерения гидрологических параметров. Традиционные методы его расчета трудозатратны, а также зачастую не позволяют оценить пространственное распределение характеристик перемещения наносов. Кроме этого, погрешности определения стока взвешенных наносов объясняются методикой расчета его расходов, которая

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 21-17-00181 - Интегральная оценка баланса наносов речной системы р. Лена)

не позволяет учесть пространственную изменчивость концентрации взвешенных наносов в поперечном профиле, а также густотой сети измерений, которая ограничивает возможности для оценки изменения расхода наносов по длине рек. На этом фоне новые возможности изучения стока наносов связаны с доплеровскими технологиями, (ADCP), которые являются перспективным средством изучения как водного стока, так и стока наносов и позволяют быстрее оценить сток наносов различных рек.

В последние годы использование доплеровских профилографов позволило накопить значительный объем данных измерений: акустических профилей скоростей воды, обратного рассеяния (которые могут быть пересчитаны в расходы взвешенных наносов) и других характеристик, создать массив данных для получения зависимости мутности воды от обратного рассеяния по результатам совместного профилирования потока и пробоотбора на р. Колыме, Лене, Оби, Оке, Селенге, а также р. Енисей и Терек в 2018-2021 гг. Всего накоплено более 1200 профилей участков р. Волги, Лены, Колымы, Оби. Оки, Селенги, р. Терек и Енисей, а также участков некоторых водотоков их бассейнов, которые могут быть использованы для построения региональных зависимостей мутности воды от акустических характеристик, крупномасштабных оценок стока и баланса наносов, а также разработки методики измерений.

В настоящий момент коммерческие профилографы представлены несколькими крупными производителями. Описанные в настоящей работе измерения проводились с использованием приборов Teledyne RDI Instruments (модели RiverRay и RioGrande). Существует и постоянно пополняется база данных, полученная по результатам измерений профилографом SonTek M9.

Доплеровский профилограф позволяет получить значение измеряемых характеристик не в одной точке, а на всем поперечном профиле сечения [Морейдо и др., 2020; Gray, Gartner, 2009]. В этом, а также в значительном уменьшении трудозатратности измерений заключаются главные преимущества профилографов в сравнении с традиционными методами измерения. Основным недостатком применения доплеровских профилографов является наличие у прибора «слепых зон»: из-за погружения прибора на некоторую глубину, а также многократного отражения сигнала измерения в приповерхностном и придонном слоях не производятся или отбраковываются в связи с недостаточной точностью.

Для измерения мутности воды с помощью профилографа используется показатель рассеяния сигнала (например, обратное рассеивание в Teledyne RDI Instruments и отношение сигнал/шум в приборах SonTek).

Выражение для интенсивности рассеяния получают посредством математических преобразований основного уравнения гидроакустики [Urlick, 1983]:

$$EL - S_c + S_v = RL \quad (1)$$

где EL – интенсивность исходящего сигнала; S_c – потери на затухание сигнала; S_v – интенсивность сигнала, отраженного от цели; RL – интенсивность принятого ADCP сигнала, дБ.

В результате математических преобразований уравнения (1) [Dominguez Ruben et al., 2020], зависимость мутности воды от акустических характеристик сигнала выражается в виде:

$$S = e^{(C'' + K_c B_s)} \quad (2)$$

где S – мутность воды; C'' и K_c – коэффициенты в линейной регрессии.

Кроме этого, существуют приборы с постоянной и переменной частотой излучения. Профилограф Teledyne RDI RioGrande обладает постоянной частотой 600 кГц, а профилограф RiverRay – переменной: набор частот от 1200 до 3000 кГц, которая автоматически задается измерителем в зависимости от глубины потока.

Важно отметить, что в зависимости от частоты сигнала изменяется чувствительность прибора к частицам разного размера [SonTek, 1997]. В связи с этим в реках с разным размером взвеси целесообразно использование профилографов с разной частотой излучения [Guerrero, Szupiany, Latosinski, 2013; Pomázi, Varanya, 2020].

Для разработки зависимостей мутности воды от обратного рассеяния во время измерения профилографом или через короткий промежуток времени после него отбирались пробы воды. Пробоотбор проводится девятиточечным методом [Промахова, Чалов, 2015]: по три точки (у поверхности, на половине глубины и у дна) на трех вертикалях (на стрежне потока, у правого и левого берегов). По сравнению с методикой, применяемой на постах сети наблюдений Росгидромета (который предусматривает отбор приповерхностной пробы на стрежне потока), этот метод пробоотбора позволяет оценить диапазон измерения мутности в потоке. Помимо этого, для настоящего исследования использование этой методики позволяет получить большее количество данных измерений, а также больший диапазон мутности воды, что позволяет улучшить качество зависимостей. После этого измеряется мутность: проба воды фильтруется на мембранный фильтр, который впоследствии высушивается и взвешивается. Мутность воды вычисляется как отношение массы взвеси на фильтре к объему фильтрования. Затем строится зависимость мутности от акустических характеристик. Эта зависимость впоследствии может использоваться для перехода к значениям мутности по всему потоку. Более того, считается, что полученная калибровочная кривая может также быть использована для разных рек (с учетом региональных особенностей и основных характеристик взвеси) [Geay et al., 2018].

В результате исследований на крупных реках России в 2018-2021 гг. были получены зависимости мутности воды от обратного рассеяния. Диапазон изменения мутности воды – от <5 мг/л до 100 мг/л; все полученные значения обратного рассеяния находятся в диапазоне от 55 до 90 дБ/м. При этом для разных серий измерений, разных рек и регионов зависимости различаются. Эти различия обусловлены следующими факторами:

1. Особенности приборов: некоторые параметры, входящие в подробную запись уравнения (1) находятся в зависимости от характеристик

излучателя, которые могут быть получены по запросу от производителя или подобраны в процессе калибровки зависимостей [Deines, 1999; Kostaschuk et al., 2005];

2. Частота прибора: сопоставление измерений разными профилографами показало лучшую воспроизводимость зависимостей мутности воды от обратного рассеяния для моночастотного профилографа RioGrande. Многочастотный профилограф RiverRay при этом дает менее однозначные зависимости;

3. Физические параметры водного объекта: температура и плотность воды влияют на распространение сигнала и его отражение [Gartner, 2004];

4. Характер течения: в очень бурных потоках увеличение обратного рассеяния вызвано наличием в воде мелких пузырьков воздуха. В более спокойных потоках вклад отражения от пузырьков воздуха в рассеяние незначителен [Urick, 1983].

5. Характеристики взвешенных веществ: гранулометрический состав отложений и его распределение во взвеси (на этот фактор также оказывает влияние водность потока, обуславливающая его транспортирующую способность), а также содержание органического вещества.

Влияние характеристик взвешенных веществ на обратное рассеяние профилографа заключается в содержании органического вещества, а также гранулометрическом составе и форме частиц. Различные гравиметрические методики определения мутности воды предполагают высушивание фильтров с взвесью при температуре 105-120 °С [Мельников, 1956; Davie, 2008]. Этот шаг приводит к значительному сокращению массы взвеси за счет органического вещества и воды. При этом некоторая часть обратного рассеяния сигнала вызвана отражением от частиц органического происхождения, учесть массу которых невозможно. Это приводит к тому, что для рек с разной долей содержания органики сильно различается вид калибровочных кривых. Более того, этот фактор также создает дополнительную погрешность при экстраполяции мутности воды методом Великанова – Рауза [Великанов, 1948; Rouse, 1937]. Распределение мутности воды выше придонного слоя, где она равна S_d , определяется по закону:

$$\frac{S}{S_d} = \left[\frac{\tilde{y}}{1 + \frac{1 - \tilde{y}}{b}} \right]^{\frac{\omega}{KV}} \quad (3)$$

где $\tilde{y} = \frac{y}{h}$ (h – глубина); $b = \frac{d_{вл}}{h}$ ($d_{вл}$ – средний диаметр влекомых наносов); ω – гидравлическая крупность; $V = \sqrt{ghI}$; постоянная Кармана $K=0,4$. Как видно из формулы (2.9), для расчетов этим способом необходима гид-

равлическая крупность частиц взвеси ω , которая различается для взвешенных наносов и находящегося во взвеси органического вещества (но не может быть оценена).

Влияние гранулометрического состава взвеси проявляется в размере и форме частиц. Степень отражения и рассеяния акустического сигнала увеличивается с ростом площади поверхности частицы, которая соотносится с ее диаметром [Thorne, Hurther, 2014]. При этом профилографы различной частоты имеют ограничения по минимальному регистрируемому размеру частиц: чем ниже частота прибора, тем меньше минимальный диаметр, который прибор достоверно регистрирует. Существуют региональные исследования, которые показывают, что существует корреляция между обратным рассеянием и мутностью отдельных классов крупности [Szupiany et al., 2019]. Данные полевых измерений также показали, что воспроизводимость мутности воды от обратного рассеяния улучшается при дифференцируемом учете крупности взвеси. Для анализа влияния гранулометрического состава были использованы результаты определения гранулометрического состава методами лазерной гранулометрии для 88 проб на участках рек, где одновременно проводились измерения расходов воды ADCP. Помимо основных зависимостей были построены зависимости долей мутности частиц разной крупности с привлечением данных о гранулометрическом составе. Для каждой пробы была определена доля мутности, составляемая частицами трех классов крупности: до 10 мкм, от 10 до 50 мкм, более 50 мкм.

В зависимости от фазы водного режима, участка и горизонта пробоотбора содержание частиц самой мелкой фракции изменялось от 16 до 57%, средней – от 32 до 71%, самой крупной – от 0 до 54%. При переходе от валового состава взвеси к крупности частиц больше 50 мкм R^2 увеличивается для р. Лены с 0,59 до 0,67, для р. Оби с 0,28 до 0,43, для р. Колымы с 0,31 до 0,51. При переходе от валового состава взвеси к крупности частиц меньше 10 мкм корреляция с обратным рассеянием, напротив, значительно снижается, и зависимость между значениями фактически отсутствует.

В совокупности с влиянием содержания органического вещества в воде, гранулометрический состав наносов обуславливает локальные и региональные различия в характере получаемых зависимостей.

Отдельные литературные источники [Rasmussen и др., 2009; Guerrero et al., 2013; Pomázi, Varanya, 2020] отмечают возможность формирования региональных зависимостей, обобщающих связь между содержанием взвешенных наносов и обратным рассеянием для разных рек. Совместный анализ более чем 170 измерений мутности воды совместно с получением акустических профилей на крупных реках России показал, что формирование однозначной зависимости для них в настоящий момент невозможно, однако для отдельных водных объектов получены достаточно тесные связи. При этом для всех изучаемых объектов можно выделить определенный диапазон обратного рассеяния: примерно от 55 до 95 дБ/м. Мутность воды в период измерений на разных реках различалась от первых мг/л до 100 мг/л. Это говорит о том, что для практического использования, а также балансо-

вых расчетов можно калибровать зависимость по одному или нескольким створам измерения, что позволяет существенно снизить количество проб для отбора.

На основании данных полевых измерений на р. Колыме, Лене, Оби, Оке, Селенге, а также р. Енисей и Терек в 2018-2021 гг. были получены зависимости мутности воды от обратного рассеяния для рек Лены, Селенги, Оби, Оки и Колымы (табл. 1).

Таблица 1. Зависимости мутности воды от обратного рассеяния для крупных рек России в разные фазы водного режима

Река	Фаза водного режима	Уравнение	R ²	R ² с грансоставом
Лена	Летне-осенняя межень	$S = 0,59e^{0,038BS}$	0,59	0,67
Селенга	Дождевые паводки	$S = 0,007e^{0,12BS}$	0,42	
Обь	Спад половодья, летне-осенняя межень	$S = 9,16e^{0,02BS}$	0,28	0,45
Ока	Летне-осенняя межень	$S = 3,2e^{0,014BS}$	0,37	
Колыма	Спад половодья, летне-осенняя межень	$S = 0,37e^{0,06BS}$	0,31	0,51

Получить однозначные зависимости для некоторых объектов по результатам измерений не представляется возможным, необходимо проведение дополнительных измерений. Источниками неоднозначности в зависимостях являются как методические (связанные с измерением мутности в пробах или недостаточностью данных для калибровки) и приборные (связанные с функционированием приборов на разной частоте в пределах одного измерения, а также использованием разных приборов) погрешности, так и региональные особенности, включающие в себя очень низкую мутность воды и маленький диапазон ее изменения (например, на крупных арктических реках в период межени).

Некоторые из полученных зависимостей приведены на рисунке 1. Зависимости для р. Колымы (по данным измерений на спаде половодья в 2019 и 2020 гг.), в отличие от других серий зависимостей для одних и тех же рек, полученных для разных лет, могут быть объединены в общую зависимость (рис. 1, А). Это связано с тем, что работы проводились с использованием одного и того же прибора при примерно одинаковой водности потока и близком распределении гранулометрического состава наносов, чего не наблюдалось в другие годы и на других объектах.

На зависимости для р. Лены, полученной в результате измерений в районе Якутского узла в 2021 году, отчетливо проявляется влияние гранулометрического состава взвеси: на графике (рис. 1, Б) большая часть точек складывается в стройную зависимость, однако несколько точек «отскакивают» от основной кривой. Данные этих двух измерений относятся к более глубоким горизонтам, где средний диаметр наносов больше. При этом, в отличие от р. Колымы, сопоставление зависимостей для разных периодов измерений оказалось неудачным.

При наличии устойчивой зависимости мутности воды от обратного рассеяния самым простым способом пересчета является перевод значений

обратного рассеяния в ячейке в мутьность и следующее за ним умножение полученного числа на скорость в той же ячейке. Этот пересчет усложняется необходимостью учитывать следующие факторы:

1. Наличие у профилографа "слепых зон" в придонной и приповерхностной частях потока, а значит, необходимость экстраполяции значений скорости потока и обратного рассеяния в эти области;

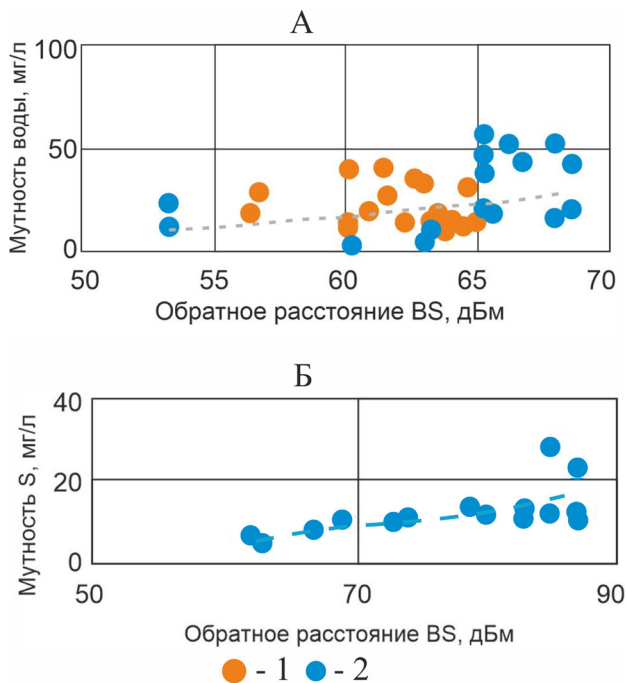


Рис. 1. Зависимость мутности воды от обратного рассеяния для р. Колымы по данным измерений 2019 и 2020 гг. (А) и для р. Лены по данным измерений 2021 года (Б): 1 – Колыма 2019, 2 – Колыма 2020

2. Наличие мелко- и мезомасштабных турбулентных и вихревых структур в потоке, а также возможность размещения створа измерения под углом к оси течения (то есть скорость в некоторых ячейках направлена не перпендикулярно створу, а под углом).

Из-за этих особенностей измерений проводить расчеты проще всего с использованием средств математического анализа, одним из которых является программный комплекс ASET [Dominguez Ruben et al., 2020]. ASET (англ. Acoustic Sediment Estimation Toolbox) – это набор инструментов на базе программного пакета MATLAB, который предназначен для обработки, визуализации и калибровки акустических данных, полученных с помощью доплеровских профилографов Teledyne.

Для расчета расхода наносов в створе в программу импортируются:

1. Файл со значениями обратного рассеяния в ячейках (.txt), полученный в результате экспорта из программы обработки измерений профилографом Teledyne – WinRiver II;
2. Файл измерения профилографом (PD0), непосредственно полученный в результате измерения;
3. Результаты калибровки зависимости.

Калибровка зависимости может быть проведена непосредственно в специальном программном модуле ASET, в который необходимо загрузить данные о мутности и гранулометрическом составе взвеси отобранных проб. Точнее всего расчеты получаются для рек с бимодальным распределением крупности частиц [Szupiany et al., 2019]. Также можно ввести уже обработанные данные вручную: необходимы данные о среднем диаметре частиц русловой и бассейновой фракции, а также коэффициент, связывающий мутность воды с обратным рассеянием.

На основании этих данных программой определяются необходимые для расчетов параметры профилографа, уточняется существующая зависимость. Результатом расчетов является значение расхода наносов в створе измерений, а также три его составляющие: фактически измеренный расход взвешенных наносов, а также полученные в результате экстраполяции расход наносов в приповерхностной и придонной областях потока. Программный комплекс ASET содержит группу методов для экстраполяции скоростей и обратного рассеяния в области, где измерения профилографом не проводятся.

При отсутствии достаточного количества измерений или достоверной зависимости для конкретного участка или реки при близкой водности может быть использовано уравнение для этой же реки или участка, но за другой период измерений.

Доплеровский профилограф является безальтернативным средством для изучения стока наносов и может быть применен в различных задачах, начиная от конкретных оценок расхода наносов в створах и крупномасштабных балансовых расчетов. Важнейшее значение имеет построение зависимости мутности воды от обратного рассеяния. К основным факторам, влияющим на характер этой зависимости, являются физические характеристики водной среды, параметры взвешенных веществ (гранулометрический состав и содержание органического вещества), а также параметры прибора.

ЛИТЕРАТУРА

- Великанов М.А. Движение наносов. – М.: Взд-во МРФ СССР, 1948. 210 с.
- Морейдо В.М., Чалов С.Р., Иванов В.А., Крастынь Е.А. Применение доплеровских измерителей течений для оценки стока наносов // Маккавевские чтения – 2020. М.: Географ. ф-т МГУ, 2021. С. 35-45.

Промахова Е.В., Чалов С.П. Современные технологии определения мутности воды // Маккавеевские чтения 2014. М.: Географ ф-т МГУ, 2015. С. 82-94.

Bux J., Peakall J., Rice H.P., Manga M.S., Biggs S., Hunter T.N. Measurement and density normalisation of acoustic attenuation and backscattering constants of arbitrary suspensions within the Rayleigh scattering regime // *Applied Acoustics*. 2019. Т. 146. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.10.022>.

Gartner J.W. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California // *Marine Geology*. – 2004. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.001>.

Geay T., Zanker S., Hauet A., Misset C., Recking A. An estimate of bed-load discharge in rivers with passive acoustic measurements: Towards a generalized calibration curve? // *E3S Web of Conferences*. 2018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184004009>.

Rasmussen P.P., Gray J.R., Glysson G.D., Ziegler A.C. Guidelines and procedures for computing time-series suspended-sediment concentrations and loads from in-stream turbidity-sensor and streamflow data: Techniques and Methods 3-C4 // *Book 3, Applications of Hydraulics Section C, Sediment and Erosion Techniques*. 2009.

Santos A.I., Carinhas D., Oliveira A., Pinto J.P., Freitas M.C., Hanes D.M. A statistical interpretation of acoustic backscatter and laser responses to suspended particle variations in the coastal shelf // *Marine Geology*. 2021. Т. 436. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106474>.

Thorne P.D., Hurther D. An overview on the use of backscattered sound for measuring suspended particle size and concentration profiles in non-cohesive inorganic sediment transport studies // *Continental Shelf Research*. 2014. Т. 73. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.10.017>.

Aleixo R., Guerrero M., Nones M., Ruther N. Applying ADCPs for Long-Term Monitoring of SSC in Rivers // *Water Resources Research*. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019WR026087>.

Dominguez Ruben L.G., Szupiany R.N., Latosinski F.G., López Weibel C., Wood M., Boldt J. Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers // *Computers and Geosciences*. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104499>.

Gray J.R., Gartner J.W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring // *Water Resources Research*. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008WR007063>.

Guerrero M., Szupiany R.N., Latosinski F. Multi-frequency acoustics for suspended sediment studies: An application in the Parana River // *Journal of Hydraulic Research*. – 2013. <https://doi.org/10.1080/00221686.2013.849296>.

Kostaschuk R., Best J., Villard P., Peakall J., Franklin M. Measuring flow velocity and sediment transport with an acoustic Doppler current profiler // *Geomorphology*. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.07.012>.

Pomázi F., Baranya S. Comparative assessment of fluvial suspended sediment concentration analysis methods // *Water (Switzerland)*. 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030873>.

Rouse H. Nomogram for the settling velocity of spheres // *Division of Geology and Geography, Exhibit D of the Report of the Commission on Sedimentation, 1936-1937*. 1937.

SonTek SonTek Doppler current meters—using signal strength to monitor suspended sediment concentration // *SonTek Application Notes*. 1997. P. 7.

Szupiany R.N., Lopez Weibel C., Guerrero M., Latosinski F., Wood M., Dominguez Ruben L., Oberg K. Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2019. <https://doi.org/10.1002/esp.4572>.

Urick R.J. Principles of underwater sound. 3rd Edition. 1983.

Ж.М. Куликова, магистрант

Е.Д. Панченко, инженер

Д.А. Мигунов, магистрант

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ЗИМНИЙ ТЕРМОХАЛИННЫЙ РЕЖИМ УСТЬЯ РЕКИ ВАРЗУГИ ПО ЭКСПЕДИЦИОННЫМ ДАННЫМ 2020 ГОДА* *(научный руководитель – к.г.н., н.с, П.Н. Терский)*

Устьевая область р. Варзуги располагается в пределах Терского берега Белого моря. Отличительной особенностью Терского берега от других берегов Белого моря является наличие редко замерзающего взморья с неустойчивым припаем. Реки Терского берега имеют высокую рыбохозяйственную ценность, так как гидролого-гидрохимические условия в устьях оказывают влияние на воспроизводство наиболее ценного вида рыб – проходных лососей, и определяют выживаемость молоди. В реке Варзуге воспроизводится одна из крупнейших в мире диких популяций атлантического лосося – семги [Алексеев, Зубченко, 2017].

По водному режиму (по М.И. Львовичу) Варзугу принято относить к рекам с преимущественно снеговым питанием и весенним половодьем. Для Варзуги характерен восточноевропейский тип гидрологического режима (по Б.Д. Зайкову, 1946) с низкой устойчивой зимней меженью, высоким

* Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова

весенним половодьем, довольно низкой летне-осенней меженью, прерываемой относительно небольшими дождевыми паводками. Устьевая область Варзуги представляет собой частично блокированный косой справа эстуарий, в широкой долине профиль которой изменяется от ящикообразного к трапециеобразному.

На устьевом участке Варзуги, на протяжении примерно 18 км, на сезонные изменения уровня накладываются приливно-отливные колебания. Влияние приливов и отливов наиболее существенно проявляются в межень. Величина приливно-отливных колебаний убывает вверх от устья. Так, по данным параллельных наблюдений в межень в 12,5 км выше устья величина приливно-отливных колебаний уровня была примерно на треть ниже, чем в устьевом створе в горловине реки [Крыленко и др., 2018].

Регулярные наблюдения за термохалинным режимом в устьевой области реки Варзуги не производятся, в устье отсутствуют гидрологические посты и метеостанции, соответственно, зимние натурные данные по режиму температуры и солености в 2020 году позволяют дать оценку зимнему ходу гидрофизических характеристик воды и динамике осолоненных вод в устье.

Материалами для настоящей работы являются данные, собранные в ходе зимней экспедиции кафедры гидрологии суши МГУ им. М.В. Ломоносова в 2020 году. Измерения гидрофизических характеристик воды (температуры и солености) выполнялись с помощью как автономных регистраторов температуры и солености StarOddi DST CT, так и с помощью зондирования толщи вод CTD-зондом YSI PRO 1000 в ходе гидрологических съёмок по продольному профилю в прилив и отлив.

Для наблюдений за ходом солености и температуры использовались 4 комплекта приборов. Регистраторы размещались на устьевом участке таким образом, чтобы охватить область преимущественного проникновения осолоненных вод.

Съёмки проводились в два дня, захватывая отдельные части приливного цикла: полная и малая вода. Участок начала съёмки был задан в районе нулевого километра (на 400 метрах в море в малую воду и на 500 метров на взморье во время полной воды). Движение было направлено от устья вверх по течению приблизительно по линии фарватера. Станции с измерениями проводились через каждые 500 метров.

Измерения солёности проводились при помощи самописцев створах 0, 2, 4 и 7 км от устья. Самописец, который был расположен в 7 км от устья, не смог зафиксировать изменение солёности воды из-за нехватки чувствительности датчика, поскольку примерно на этом расстоянии расположена граница проникновения осолоненных вод. При анализе динамики осолоненных вод на устьевом участке по данным самописцев можно пользоваться как ходом солёности, так и ходом температур воды, поскольку понижение температуры воды является маркером прихода солёных морских вод, которые холоднее речных.

Анализ изменений солёности в створах 2 и 4 км от устья проводится на основе первого цикла 31 января, во время которого одновременно работали оба самописца (рис. 1).

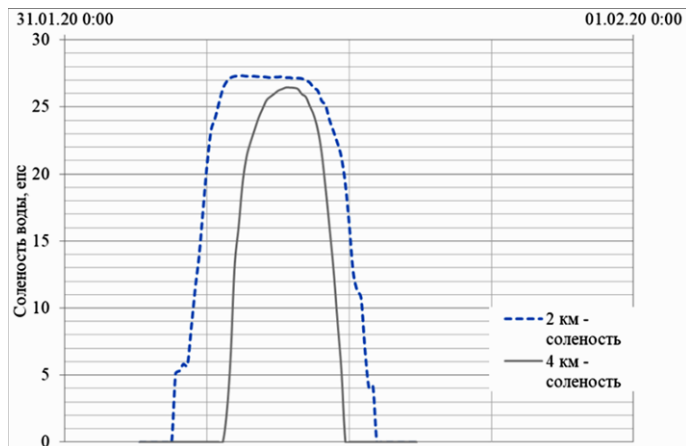


Рис. 1. График изменения солёности в первый приливный цикл 31.01.2020 в створах 2 и 4 км от устья

Рост солёности в 2 км от устья начался в 4:40, максимум был достигнут в 7:20 и составил 27,34 епс, далее следовало снижение солёности до 13:00, когда было снова зафиксировано значение в 0 епс (единицы практической солёности). Длительность цикла (промежуток времени, в течение которого солёность воды в створе превышает 1 епс) в створе 2 км составила 8 часов 20 минут. В 4 км от устья значения солёности начали увеличиваться в 6:50, что на 2 часа 10 минут позже, чем в 2 км от устья. Максимум солёности в 26,46 епс был достигнут в 9:20, что на 2 часа позже времени достижения максимума в 2 км от устья. Значение солёности вернулось к 0 епс в 11:40, то есть на 2 часа 20 минут раньше, чем в створе 2 км. Общая длительность цикла в створе 4 км составила всего 4 часа 50 минут, что говорит о том, что длительность нахождения осолонённых вод в этом створе на 3,5 часа меньше, чем в створе 2 км. В створе 2 км вершина графика плоская, т.е. солёность долгое время держится примерно на одном уровне, около 27 епс, солёные воды задерживаются на 3 часа с 7:00 до 10:00. Время подъёма солёности и время её снижения в створах 2 и 4 км отличаются не более чем на 30 минут, значит можно говорить о симметрии.

Также наблюдения за ходом гидрофизических параметров выполнялись в течение всего приливного цикла на устьевом участке на расстоянии 4,5 км от устьевого створа с помощью зондирования толщи вод. По полученным результатам были составлены карты-схемы хода температуры и солёности во время всего цикла (рис. 2). Начало измерений на карте-схеме иллюстрируют отлив: вместе с понижением уровня наблюдается снижение

солености. Уход морских вод характеризуется достаточно равномерным снижением солености по всей глубине. В данной точке морские воды заходят достаточно с высокой скоростью и остаются на непродолжительный срок, это объясняется удаленностью от устьевого створа. На глубине градиенты изменения солености по времени ниже, чем в более высоких слоях, потому что соленые воды, являясь более плотными, заходят выше по дну, создавая пикноклин.

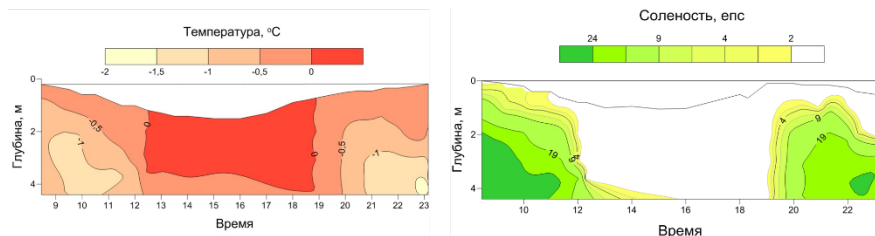


Рис. 2. Карты-схемы хода температуры и солености в течение всего приливного цикла.

Удаляясь во время отлива, более соленые воды дольше сохраняются на донной поверхности. Скорость проникновения морских вод при приливе выше, чем опреснение вод при отливе, что иллюстрируют изогалины: на приливе они расположены чаще, чем на отливе. Это подтверждается и ходом температуры на протяжении всего времени наблюдений. Скорости проникновения осолоненных вод в начале прилива больше в несколько десятков раз скоростей опреснения вод на отливе: в начале прилива градиент изменения солености составляет 14,6 eps за 1 час. В начале опреснения вод и понижения уровней воды градиент изменения солености равен -0,7 eps в час. Если мы продлим ряд наблюдений и проанализируем полное время наступления пика солености и установления постоянной солености в конце прилива, мы получим, что в данный день период наступления полных вод от низких (по характеристикам солености) составил примерно 3,5 часа, а период времени, за который соленые морские воды покинули 5 км от устьевого створа, составил порядка 5-6 часов.

Для полноценного понимания происходящих во время приливного цикла процессов необходимо рассматривать изменения солености и температуры не только во времени, но и по пространству. Для решения этой задачи были выполнены 2 съёмки температуры и солености. Съёмка на малой воде была проведена в конце отлива, близко к минимальному уровню воды, она велась вниз по реке по линии фарватера, в сторону моря, станции осуществлялись каждые 500 метров. Аналогичная съёмка была проведена на полной воде: станции в ходе проведения съёмки отмечались каждые 500 метров, начиная с точки выше устьевого створа на 500 метров и заканчивая на 7,5 километре, так как далее солёность не превышала 1 eps. По получен-

ным в течение съёмки результатам были построены карты-схемы пространственного изменения солёности и температуры (рис. 3).

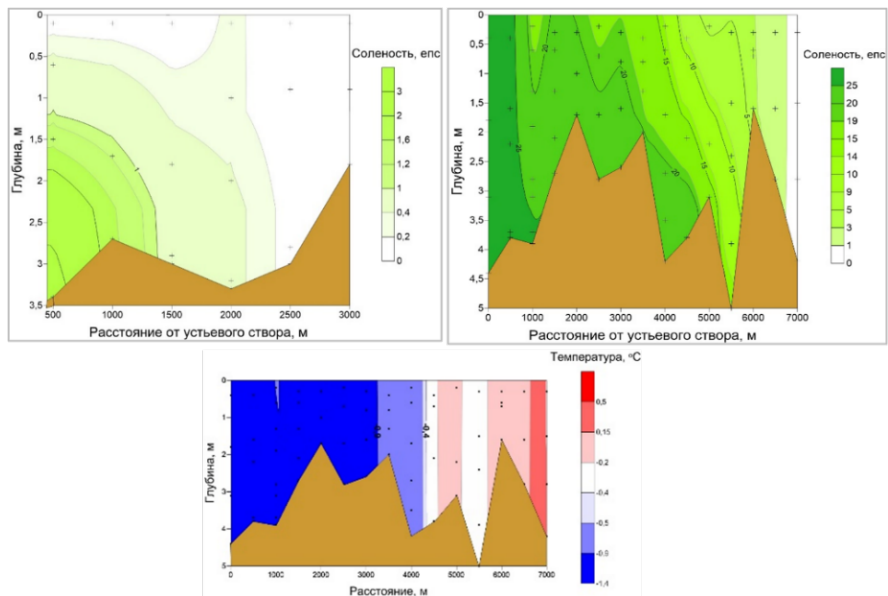


Рис. 3. Карты-схемы распределения: солёности в период полной воды и солёности в период малой воды, температуры в период полной воды.

В момент съёмки на полной воде, в конце прилива в устьевой области наблюдаются максимально возможные объемы морской воды, еще не опресненные и не вытесненные со взморья речным стоком. При рассмотрении карты-схемы можно увидеть максимальные значения солёности до 28 eps в районе устьевого створа, а затем вверх по реке показатель солёности постепенно снижается, но даже на расстоянии 6500 метров от устьевого створа солёность достигает 3 eps. Морская вода заходит в реку по дну, однако представленный рисунок не отражает наличие вертикальной стратификации, что может говорить о хорошо перемешанном состоянии вод к концу прилива. Изогалины направлены не по нормали ко дну, а несколько под углом.

Карта-схема пространственного распределения температуры воды подтверждает наличия морских вод в устье. По мере уменьшения солёности с удалением от устьевого створа происходит повышение температуры, в какой-то момент, она даже становится выше нуля, что говорит о близости к речным пресным водам.

При рассмотрении положения осолоненных вод к концу отлива наблюдается классическое распределение солёности. Максимальные значения

солености, около 2 единиц практической солености (епс) наблюдается в море, при удалении от устьевого створа соленость постепенно понижается и достигает нулевых значений на расстоянии уже 3000 метров. Так как съёмка была произведена в момент времени малых вод, когда отлив уже почти закончился, и почти вся морская вода успела уйти из устьевой области, на акватории устья наблюдаются пониженные значения солености. Необходимо также отметить практически однородное распределение солености по глубине на каждой станции проведения измерений, что характеризует окончание отлива, так как отсутствует ярко выраженное направление движения морских вод и стратификация не наблюдается.

Приливные повышения уровня, сопровождающиеся проникновением осолоненных вод в русло реки, обладают большими скоростями, чем отливные. Несмотря на высокую скорость проникновения морских вод на приливе, осолоненные воды достигают створ 4 км на два часа позже, чем створ в 2 км, а также разница в продолжительности нахождения осолоненных вод в створах, расстояние между которыми составляет 2 км, достигает 3,5 часов.

По результатам съёмки в полную воду была установлена дальность проникновения осолоненных вод в условиях зимней межени: она составила 7,5 км. Также были отмечены характерные значения солености: на расстоянии 0,5-1,5 км от устьевого створа по всей глубине соленость воды порядка 27 епс. На участке 1,5-4 км практически вся вода солённостью около 26 епс, только у поверхности солённость воды резко снижается до 8-12 епс. Далее выше по течению реки глубина с максимальным градиентом солёности воды опускается ниже, у дна значения солёности становятся меньше.

В малую воду осолоненные воды отмечались только ниже 1,5 км. Для вертикального распределения характерна стратификация – вплоть до устьевого створа в поверхностном слое расположена пресная вода, осолоненная (около 3,5 епс) – только у дна.

Таким образом, отслеживание изменений физических характеристик воды, солёности и температуры, в устьевых областях является важным инструментом, позволяющим исследовать динамику приливных волн, наряду с характеристикой колебания уровня воды.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев М. Ю., Зубченко А. В. Причины депрессивного состояния стада атлантического лосося реки Варзуга (Кольский полуостров) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2017. №. 2 (163).

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 02. Белое море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Справочник. // Л.: Гидрометеоздат, 1991. 241 с.

Крыленко И. В., Липка О. Н., Суткайтис О. К. Причины и последствия изменения русла в нижнем течении реки Варзуги. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2018. 200 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОПОР МОСТА НА УСТЬЕВОЙ УЧАСТОК Р. ОКА И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СНИЖЕНИЮ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ДЕФОРМАЦИЙ

(научный руководитель - к.т.н., доц. Ю.Е. Воронина)

Нижний Новгород – один из древнейших городов России, который по сей день привлекает туристов своей невероятной архитектурой. Еще со времен СССР тысячи туристов из разных уголков мира на теплоходах приезжали прогуляться по Чкаловской лестнице, а также полюбоваться Нижегородским кремлем. Но в последнее время из-за осложнённой судоходной ситуации на участке Городец – Нижний Новгород пассажирские круизные суда практически перестали швартоваться на причалах Нижнего Новгорода. Однако в рамках стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года (распоряжение Правительства Российской Федерации от 29 февраля 2016 года № 327-р) эта проблема планируется решиться в ближайшее время.

Новый мост, введенный в эксплуатацию 2012 г (опоры возведены в 2009 г), почти сразу изменил гидравлику потока. Анализ полученных результатов [Гидрометеоиздат, 1984] продольных деформаций показал, что после установки мостовых опор, объём наносимости увеличился практически в 2 раза на протяжении всего участка. Особенно сильная концентрация донных отложений проявилась на участке от Молитовского моста до Метромоста и в месте впадения реки Оки в Волгу. В настоящее время наблюдается образование "сухих" побочней у берегоукрепительных сооружений – вода не доходит до укрепленной части береговой полосы (рис. 1).

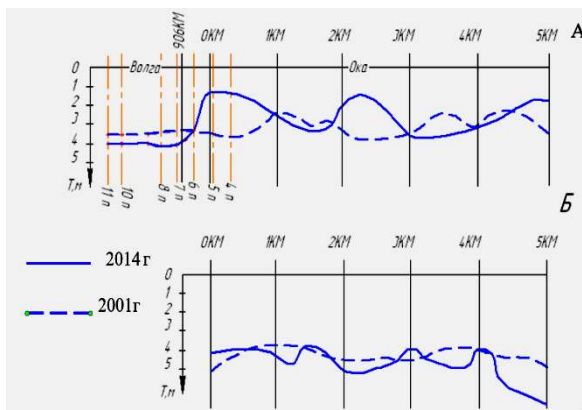


Рис. 1. Продольные деформации: А – правого берега; Б – судового хода

Из-за кинематического нарушения структуры водного потока, на подходе к опорам моста образовалась водная воронка. Сбоку от опоры скорости возросли в 2 раза, что привело к размыву дна и как следствие падению глубин (рис. 2).

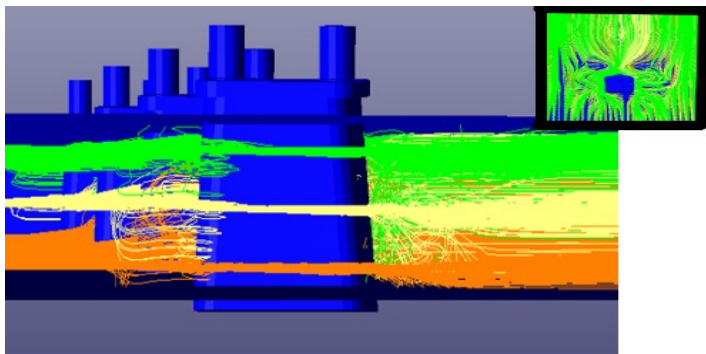


Рис. 2. Влияние опоры на русло

Водный поток, проходя зону возмущения, за счет вращательных сил турбулентного обмена, повысил свою отметку. Так образуется подпор. По мере увеличения турбулентного обмена, транзитные скорости уменьшаются, а отметки свободной поверхности воды повышаются.

В качестве возможных решений по снижению негативных последствий деформаций после строительства моста предлагается два способа: проведение дноуглубительных работ, с дальнейшими поддержанием заданных габаритов, либо строительство наносоуправляющих сооружений.

Для проведения дноуглубительных работ была произведена оценка геологического строения русла в месте разработки. Результаты которой выявили, что устьевой участок сложен из песчаного грунта с примесью глины (рис. 3).

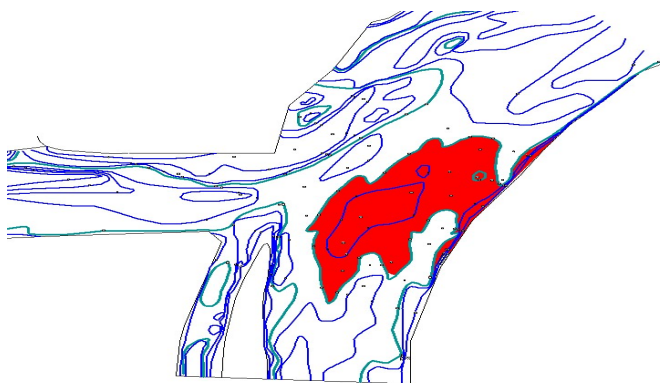


Рис. 3. Проблемная зона отложения наносами, требующая дноуглубления

Падение уровня воды, за весь период навигации, не превышает 1 м. При выемке грунта необходимого изъять 223 тыс. м³ грунта, предполагается использование многочерпакового земснаряда.

Используя методику Г.И. Шамова, стало известно, что такая прорезь сможет продержаться около 2,5 лет, до полного обратного занесения. Такой вариант является неплохой альтернативой для решения задачи по снижению негативных последствий, но имеет существенный недостаток в виде недолговечности и постепенной посадки уровня при дноуглубительных работах. А это крайне опасно для лимитирующего участка, расположенного на периферии "Городец-Нижний Новгород".

Вторым рассмотренным вариантом решения является строительство наносоуправляющих сооружений различных конфигураций. Наносоуправляющие сооружения типа донных порогов, высота которых преимущественно меньше глубины потока (в долях от полной его глубины), устанавливают на дне реки под некоторым углом к общему направлению течения. Они перехватывают наносы, движущиеся в придонных слоях потока.

При выборе варианта с донными порогами их расположение на местности сильно влияет на гидравлику потока. Поэтому наиболее важно расположить донный порог таким образом, при котором гидравлический эффект от них будет максимален, а последствий строительства будут минимальны (может спровоцировать множество негативных последствий, таких как донная и боковая эрозия, падение глубин, переформирование русла и много других).

При различных вариантах размещения порогов были произведены расчеты с целью установления наиболее предпочтительного угла расположения сооружений, их количества в русле, а также местоположение относительно основного судового хода (рис. 4).

Как показали результаты программы, при всех рассмотренных вариантах основные зоны возмущения пролегают на судовом ходе, тем самым провоцируя аварийно-опасные ситуации. Донные пороги вызвали завихрения потока в нижнем бьефе. При прохождении по участку, судну придется испытать на себе действие неправильных течений в виде турбулентности, что может привести к столкновению судов друг с другом. Учитывая сказанное, и специфику близкой расстановки сооружений к судовому ходу, деформационно-восстановительная задача в прибрежной зоне Речного вокзала является невыполнимой.

Другим рассмотренным вариантом наносоуправляющего сооружения является полузапруда [Фролов, 2007]. Её полезная работа заключается в сжатии потока и перенаправлении основных скоростей в свободную часть русла. Длина сооружений принималась таким образом, чтобы полузапруда не препятствовала навигации (не заходила на судовую ход) [Гришанин, 1986]. Для анализа влияния угла расположения полузапруд на гидравлику потока задавались различные углы, выбираемые исходя из особенности местности и их гидравлических параметров.

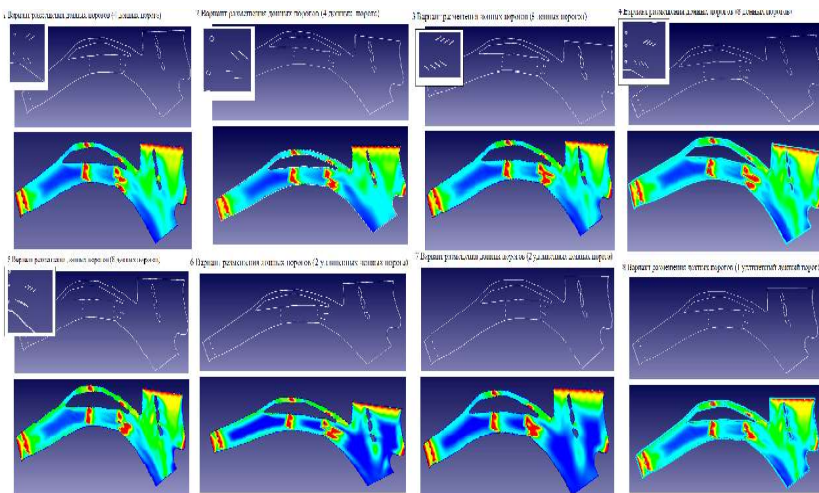


Рис. 4. Модели распределения зон турбулентности

Как показали результаты расчета (рис. 5), полузапруды перенаправили поток в сторону правого берега, увеличив скорости течения возле причалов (правый берег) и уменьшив его со стороны острова по основному руслу. Зоны турбулентного обмена расположились непосредственно за полузапрудками и не осложняют движение, как для основного, так и для дополнительного судового хода. При таком виде перераспределении скоростей на пред причальными подходами стал наблюдаться саморазмыв дна. Такой вариант применения полузапруд позволяет избавиться от ежегодного проведения дноуглубительных работ. И из всех вышеописанных вариантов является наиболее предпочтительней.

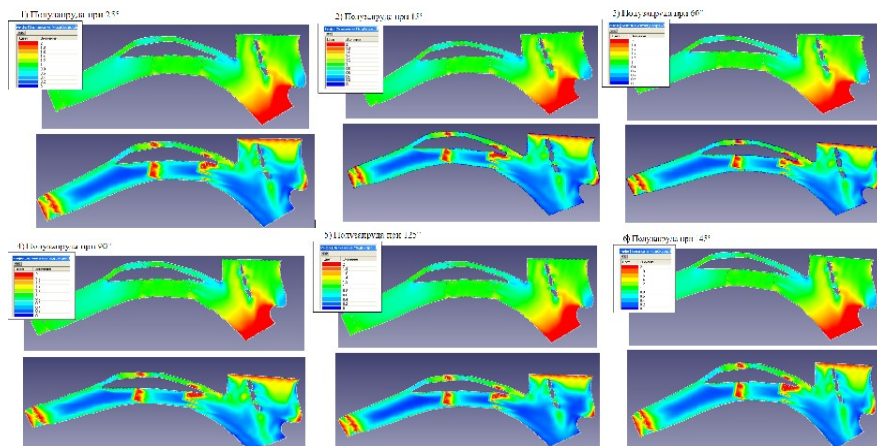


Рис. 5. Модели размещения полузапруд при 25°,45°,60°,90°,125°,145°

Угол поворота наносанавливающих сооружений напрямую влияет на гидравлику потока. Поэтому на основании выполненных расчетов в программном комплексе FlowVision [Липатов, 2009] был подобран оптимальный угол поворота сооружения, для достижения наилучшего эффекта в виде максимальных вдольбереговых скоростей течений.

Результаты расчета осредненных вдольбереговых скоростей правого берега представлены в таблице 1.

Таблица 1. Скорости возле причалов при различных углах наклона полузапруд

№ причала	Скорость V, м/с					
	25°	45°	60°	90°	125°	145°
4	0,7	0,7	0,9	0,8	0,8	0,9
5	0,9	0,9	1	1	0,9	0,9
6	1	1	1,1	1,1	1	1
7	1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,05
8	1,1	1,2	1,3	1,2	1,25	1,1
10	1,45	1,5	1,7	1,6	1,6	1,3
11	1,3	1,4	1,5	1,5	1,45	1,4

Результаты показали, что максимальные скорости возле причалов наблюдаются преимущественно возле 10 и 11 причала. И варьируются в пределах от 0,7 до 1,4 м/с. Минимальные возле 4-го причала (0,7- 0,9 м/с).

Максимальные скорости возле причалов наблюдаются при $\alpha=60^\circ$ (рис. 6), что позволяет считать именно данный вариант установки выравнивательных сооружений наиболее предпочтительным на данном участке.

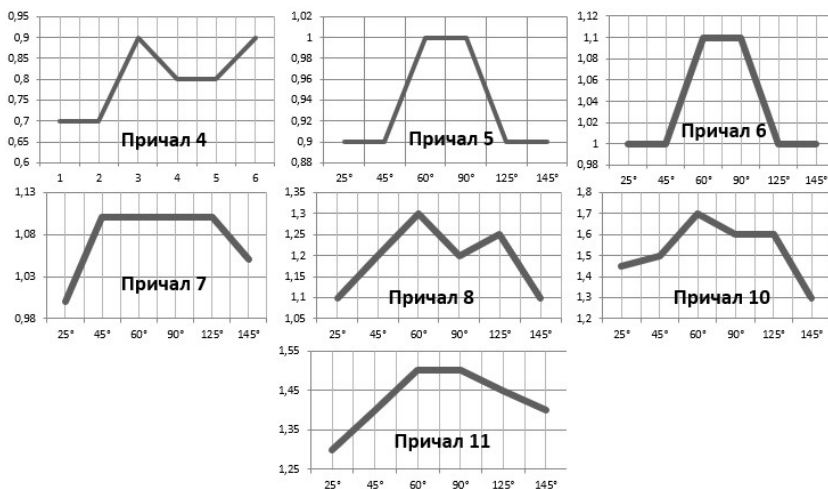


Рис. 6. Изменение средних скоростей от угла поворота для различных причалов Речного вокзала г. Нижний Новгород

Таким образом, для исправления негативного последствия, в виде русловых деформаций на р. Оке после сжатия мостовыми опорами русла, целесообразнее и наиболее эффективно устройство трех вдоль-островных полузапруд с углом поворота 60° к основному течению. Такой вариант решения проблемы позволит снизить деформационные последствия строительства путем саморазрыва береговой полосы. И это позволит избежать постоянных дорогостоящих дноуглубительных работ с последующим руслоочищением от значительной заносимости подходов к причалам г. Нижний Новгород.

ЛИТЕРАТУРА

Гришанин К. В. Водные пути / К.В. Гришанин, В.В. Дегтярев, В.М. Селезнев. – М.: Транспорт, 1986. – 400 с

Липатов И.В., Молчанова М.В. Исследование гидродинамики речного потока на базе численного моделирования. Ниж.Новгород: Изд-во ВГАВТ», 2009. 36 с.

Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик - Л.: Гидрометеиздат, 1984. - 448 с.

Фролов Р.Д., Воронина Ю.Е. Улучшение судоходного состояния перекатного участка реки – Ниж. Новгород: Изд-во ВГАВТ, 2007. 40 с.

Серебряков А.В., Бутылин А.М., Морозов А.П. Организация и планирование путевых и строительных работ на речном транспорте. – М.: Транспорт, 1986.

А.А. Куракова, аспирант

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

РАЗМЫВЫ БЕРЕГОВ НА КРУПНЕЙШИХ РЕКАХ ОБЬ-ИРТЫШСКОГО БАССЕЙНА*

(научный руководитель – д.г.н., проф. Р.С. Чалов)

Крупнейшие реки бассейна – Обь и Иртыш – являются важными водными артериями Западной Сибири и широко используются при водохозяйственном и воднотранспортном освоении. Размывы берегов – одни из наиболее распространенных опасных проявлений русловых процессов, угрожающих как населенным пунктам, так и объектам социальной и хозяйственной инфраструктуры. Изучение размывов берегов на главных реках бассейна началось с XVI века при освоении Сибири и Дальнего Востока, которые в дальнейшем приобрели характер академических научных исследований. Большой толчок в изучении рек и русловых процессах на них был в

* Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-35-90003\20) и РНФ (проект № 18-17-00086 П)

середине XX века в связи с разведкой и освоением нефтяных и газовых месторождений, а также созданием Новосибирского гидроузла [Русловые процессы..., 2001].

Однако многие работы дают лишь общие представления о размывах берегов, не увязывая их с морфологией русла, его параметрами, динамикой потока и характеристиками водного режима. Исключения составляют отдельные работы, посвященные среднему и нижнему течению Оби [Куракова, Чалов, 2019, 2020].

Части бассейнов средней и нижней Оби и нижнего Иртыша расположены в пределах равнинной территории с высотными отметками до 200 м, которая сложена супесчано-суглинистыми отложениями различного происхождения (ледникового, водноледникового, речного и озерного) (рис 1). Поэтому русла средней и нижней Оби и нижнего Иртыша находятся практически в однородной геолого-геоморфологической обстановке, а их развитие происходит в свободных условиях, сопровождаясь активными горизонтальными русловыми деформациями [Русловой режим..., 1994].

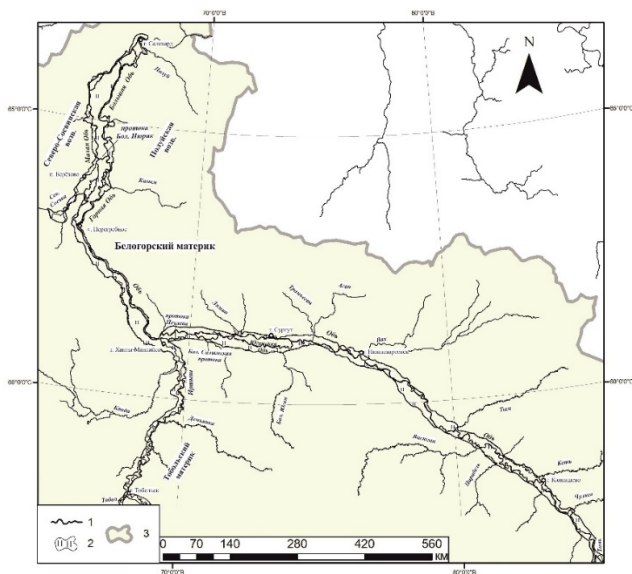


Рис. 1. Общая схема Обь-Иртышского бассейна. 1 – крупные реки, 2 – пойма, 3 – граница бассейна.

Средняя и нижняя Обь (от слияния с р. Томью до г. Салехарда) и нижний Иртыш (от слияния с р. Тоболом до устья) являются крупнейшими реками бассейна и России. Ширина поймы на Оби – от 10 км до 40 км с максимумом 60 км в нижнем течении (район п. Берёзово), на нижнем Иртыше – от 5 до 20 км, пойма которого в нижнем течении становится общей для него и Оби. На обеих реках пойма луговая или закустаренная, местами

заболоченная, имеющая большое количество пойменных озер, стариц и солов, и расчлененная многочисленными пойменными протоками (ответвлениями). Ширина русла изменяется от 0,5 до 3 км на средней и нижней Оби и от 0,5 до 1,5 км на нижнем Иртыше.

Для средней и нижней Оби характерно уникальное раздвоенное русло, представляющее собой разделение реки на два равноценных по водности рукава, проходящих в левой и правой частях днища долины на протяжении сотен километров. На средней Оби оно образовано собственно Обью и левыми рукавами – протоками Юганская Обь, Большая Салымская и Неулева. Нижняя Обь разделяется на левый (Малая Обь) и правый (Горная Обь, впоследствии изменяющая свое название на Большую Обь) рукава. Правый рукав почти на всем протяжении протекает вдоль правого коренного берега – Белогорского материка. Рукава связаны между собой по многочисленным пойменными протокам (ответвлениям); на границы ХМАО-Югры и ЯНАО Малую и Горную Обь связывает крупный квазипоперечный рукав – протока Большой Нюрик. Рукава раздвоенного русла нижней Оби, в свою очередь, сами образуют раздвоенное русло. Слияние рукавов – Малой и Большой Оби происходит выше г. Салехарда [Чалов, Камышев и др., 2021; Чалов, Завадский и др., 2021].

Нижний Иртыш имеет субмеридиональное направление, испытывая на большей протяженности русла влияние правого борта долины – возвышенности Тобольский материк и имея в основном широкую левобережную пойму. По геолого-геоморфологическими условиями формирования русла нижнее течение реки можно разделить на 3 участка: I – между устьями рек Тобола и Демьянки, II – между устьями рек Демьянки и Конды, III – от устья р. Конды до слияния с Обью, различающиеся по ширине поймы и взаимодействию русла с коренным правым берегом.

Обь и Иртыш имеют преимущественно снеговое питание и относятся, по классификации Б.Д. Зайкова, к рекам с западносибирским водным режимом. До 50% стока воды проходит во время весеннего половодья, зимой не более 10-15 %, остальное – в летне-осенний период. Среднегодовое расход воды Оби изменяются от 4000 м³/с (г. Колпашево) до 12800 м³/с (г. Салехард), увеличиваясь в 3 и более раза; на нижнем Иртыше – от 2150 м³/с (г. Тобольск) до 2800 м³/с в устье. Максимальные расходы Оби – от 29800 м³/с до 42800 м³/с, Иртыша – от 6500 м³/с до 8000 м³/с, соответственно. Средняя продолжительность половодья на средней и нижней Оби изменяется от 120 до 140 дней, на нижнем Иртыше – около 130 дней, отличаясь особенно в нижнем течении Оби долгим и глубоким затоплением поймы. Обь и Иртыш перемененно подпирают друг друга в период весеннего половодья, которое проходит в разное время на реках, распространяясь на 200-400 км [Петров, 1979].

Анализ характеристик размывов берегов и определение параметров форм русла проводились на основе данных дистанционного зондирования Земли («Sentinel-2», «Landsat 5 TM», «CORONA KH-4A, B») за два временных интервала: 1969–1988 гг. и 2017-2020 гг. Скорости смещения русла за

рассматриваемые периоды были определены двумя методами. Первый – традиционный для разветвленного русла Оби, заключающийся в оцифровке границ русла вручную; второй – автоматизированный – дешифрирование снимков спутниковых снимков и построения на их основе осевых линий русла реки, которые сравниваются за разные годы [Завадский и др., 2019]. В результате по всей длине рассматриваемых рек были определены местоположения фронтов размыва и их характеристики: скорости (C_{cp} , м/год) и длина ($L_{фр}$, км). Скорости размыва берегов определялись как частное от деления величины отступления береговой линии на временной промежуток (от 30 до 50 лет). Разрешение космических снимков (3-30 м) и точность методики определяют пороговое значение выявляемых скоростей размыва берегов – 0,5-1 м/год. Полученные результаты по размывам берегом были откорректированы и уточнены на основе карт русел и во время экспедиционных исследований на средней и нижней Оби (2018-2020 гг.) и нижнем Иртыше (2021 г).

Одним из важнейших факторов, который оказывает влияние на перестроение русла, является водный режим. Ввиду того, что плотность гидрологических постов на рассматриваемых реках невелика, был использован косвенный показатель – порядок реки (N). Он характеризует размер реки и изменение расходов воды вниз по течению. Порядок реки был рассчитан по схеме А. Е. Шайдеггера в интерпретации Н. И. Алексеевского [Алексеевский, 2004]: $N = \log_2 P + 1$ (P – количество водотоков с длиной меньше 10 км). Тесная связь между среднесреднегодным расходом воды (Q_{cp} , м³/с) и порядками Оби и Иртыша (N) описывается экспоненциальным уравнением вида $Q_{cp} = ae^{bN}$ (коэффициент корреляции достигает 0,92 и 0,96). С увеличением порядка (водоносности) на нижнем Иртыше наблюдается возрастание скоростей размыва берегов (рис. 2); для средней и нижней Оби изменение темпов смещения русла имеет обратный направленный тренд, что обусловлено увеличением степени рассредоточенности стока по длине реки из-за постоянного расширения поймы, увеличения разветвленности русла и количества пойменных протоков, появления раздвоенного русла.

Свободные условия развития русловых деформаций на Оби и Иртыше способствуют активному развитию горизонтальных русловых деформаций. Для всей средней и нижней Оби средние скорости изменяются от 1,0 до 13,3 м/год, среднемаксимальные – 1,1-26,6 м/год (табл. 1).

При широком диапазоне скоростей размыва берегов, происходит резкое снижение скоростей размыва в ее рукавах в 1,5-2 раза после появления раздвоенного русла в нижнем течении Оби. Это обусловлено рассредоточением (а, следовательно, снижение руслоформирующего расхода) стока по рукавам раздвоенного русла и русловых разветвлений, многочисленным пойменным протокам (до 15% общего расхода), а также существенным оттоком воды в пойму при ее затоплении (до 59% ее стока [Барышников, 1988]), на фоне постоянного изменения морфодинамического типа русла, а также влияния коренных берегов, оказывающих направляющее воздействие на поток. Вдоль

них русло в основном прямолинейное, а их размывы либо локальны, либо их отступление связано со склоновыми процессами (оползни), развитие которых провоцируется воздействием потока. Пойменные берега отступают с небольшой скоростью, обуславливаясь отклонением потока у крупных побочной или в левых пойменных рукавах. Исключение составляют берега, образованные уступами речных аллювиальных террас, сложенных легкоразмываемыми песчаными отложениям, характеризующиеся очень интенсивным (до 25 м/год) отступанием берегов, чему способствует слив осветлённых вод с выклинивающейся непосредственно выше по течению поймы. На нижнем Иртыше средние скорости размыва берегов колеблются от 1,3 до 11,3 м/год, максимальная – 17,2 м/год, возрастая вниз по течению (табл. 1).

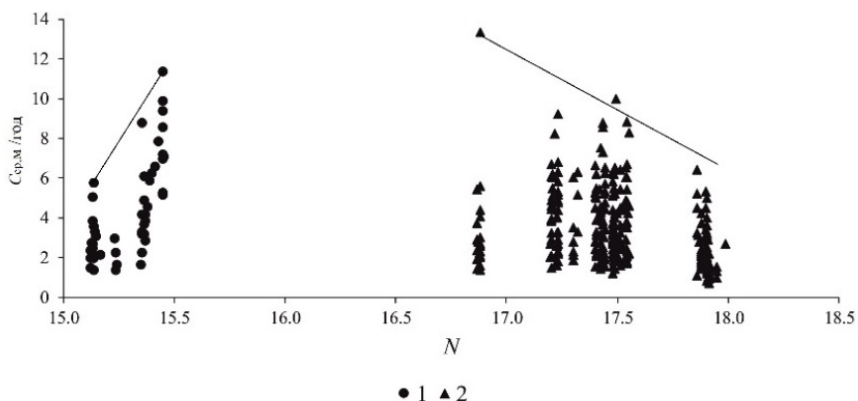


Рис. 2. Связь средней скорости размыва берегов ($C_{ср}$, м/год), порядка реки (N) на всех излучинах Иртыша (1) и Оби (2)

Таблица 1. Характеристики размыва берегов на средней и нижней Оби и нижнем Иртыше

Участок	Характеристики размыва берегов		
	$C_{ср}$, м/год	$C_{ср\max}$, м/год	$L_{фр}$, км
Средняя Обь (между устьями Томи и Ваха)	3,1	26,6	944
Средняя Обь (между устьями Ваха и Иртыша)	3,2	17,6	496
Юганская Обь	1,7	5,3	98
Большая Салымская протока	1,9	6	21
протока Неулева	1,7	3,1	56
нижняя Обь (от устья Иртыша до с. Перегребного)	2,9	16,6	240
Малая Обь (в пределах ХМАО-Югры)	2,6	10,1	211
Горная Обь	1,9	6,8	163
Малая Обь (в пределах ЯНАО)	1,2	10,7	256
Большая Обь	2,1	8,7	200
Обь (ниже слияния Малой и Большой Оби)	1,9	7,4	72
Иртыш (между устьями Тоболом и Демьянкой)	1,3	11,9	76
Иртыш (между устьями Демьянкой и Кондой)	1,9	13,0	84
Иртыш (от устья Конды до устья)	5,5	17,2	46

На всем протяжении средней и нижней Оби происходит постоянная смена морфодинамических типов русла: относительно прямолинейное, неразветвленное, извилистое (меандрирующее) и разветвленное, в том числе раздвоенное, русла. Нижний Иртыш до самого устья сохраняет извилистое русло (66 % общей длины); его излучины нередко осложнены разветвлениями в привершинных частях и на крыльях излучин.

Размывы берегов в различных типах русла в целом несколько ниже на нижней Оби, чем для средней. Это также объясняется большей рассредоточенностью стока в раздвоенном русле в нижнем течении реки при расширении поймы до 60 км и ее длительном и глубоком затоплении. В среднем течении (выше устья р. Кети) руслоформирующий расход воды проходит в бровках поймы, на широтном участке и в нижнем течении – при ее полном затоплении [Русловые процессы..., 2001]. Наиболее активные размывы берегов происходят в пойменно-русловых разветвлениях, рукава которых образуют серии излучин (от 2 до 6), вписанных и вынужденных излучинах, где в первом случае вогнутый берег сложен легкоразмываемыми песчаными отложениями, а во втором – образование водоворотной зоны из-за нарушения условий безотрывного обтекания потоком берегов ($r > 3b_p$) [Маккавеев, 1955], а также слива осветленной воды с выклинивающегося выше по течению пойменного массива; выделяются свободные и прорванные излучины, в которых наряду с активным развитием спрямляющего рукава продолжает функционировать старое русло. Почти половина береговой линии нижнего Иртыша (42%) размывается в свободных излучинах со средней скоростью размыва – 3,3 м/год, максимум – 17,2 м/год.

Степень развитости форм русла (излучины русла или рукавов разветвлений, в т.ч. раздвоенных), как один из важнейших морфологических параметров, определяет скоростное поле потока, расположение и протяженность фронта и интенсивность размыва берегов в их пределах. На средней и нижней Оби и нижнем Иртыше точки на графике связи скорости размыва берегов от степени развитости свободных излучин можно разделить на группы в соответствии со степенью (рис. 3а, б): I – пологие ($l/L = 1,1 \div 1,4$), II – разветвие ($l/L = 1,4 \div 1,7$) и III – крутые ($l/L > 1,7$) (по классификации [Чалов и др., 2004]); они описываются верхними огибающими как для Оби в целом, так и отдельно для ее участков, а также для нижнего Иртыша, показывая, что скорости размыва берегов растут на излучинах с $l/L < 1,7$, после чего интенсивность горизонтальных деформаций снижается.

Такая закономерность распределения скоростей размыва берегов как на Оби, так и на Иртыше соответствует переходу от пологих излучин к развитым, а затем к крутым, что также находит отражение в последовательной смене продольного смещения продольно-поперечным и поперечным [Чалов и др., 2004]. Обусловлено это утратой извилистой формой русла гидравлической выгоды, ростом потерь напора [Маккавеев, 1955], в результате чего происходит снижение интенсивности русловых деформаций [Попов, 1965] в диапазоне $l/L = 1,4 \div 1,7$. Отсутствие на Оби, в отличие от нижнего Иртыша, явной границы перехода к снижению скоростей размыва

берегов, вероятно, обусловлено большим количеством факторов, влияющих на формирование и развитие свободных излучин.

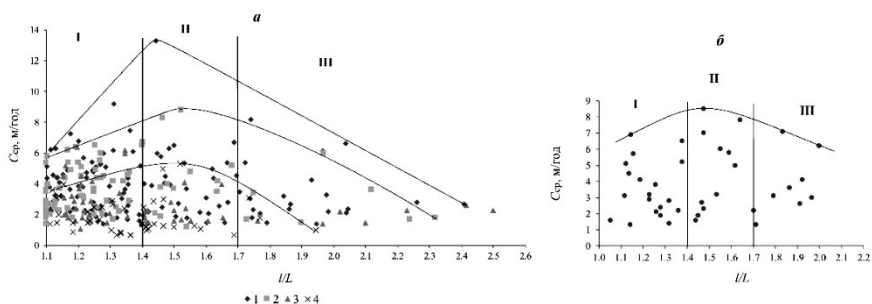


Рис. 3. Связь степени развитости (l/L) и средней скорости размыва берегов ($C_{ср}$, м/год) на Оби (а) и Иртыше (б).

Обь (а): 1 – средняя Обь (между устья рек Томь и Вах), 2 – средняя Обь (между устьями рек Вах и Иртыш), 3 – нижняя Обь (от слияния с р. Иртышом до протоки Большой Нюрик), 4 – нижняя Обь (от протоки Большой Нюрик до г. Салехарда). I-III – объяснение в тексте

Обь и Иртыш характеризуются активными горизонтальными деформациями, проявляющихся в размывах берегов и представляющие реальную и потенциальную угрозу при освоении приречных территорий. На средней и нижней Оби отсутствует направленный тренд в изменение темпов размыва берегов вниз по течению ввиду рассредоточения стока воды по рукавам, длительное и глубокое затопление поймы. На нижнем Иртыше, наоборот, наблюдается возрастание скоростей размыва берегов вниз по течению в соответствии с увеличением расходов воды и по мере ослабления влияния коренного берега. Интенсивность размыва берегов в различных типах русла выше на средней Оби, чем в ее нижнем течении, обуславливаясь рассредоточенностью стока и влиянием коренных берегов; на нижнем Иртыше основные переформирования связаны с развитием свободных излучин. Характеристики размывов берегов ($C_{ср}$, м/год, $L_{фр}$, км) как на Оби, так и на Иртыше зависят от параметров форм русла, которые определяют структуру скоростного поля потока и циркуляционные течения, оказывая влияние на темпы и длину фронта размыва. С ростом степени развитости форм русла скорости размыва берегов на Оби и Иртыше возрастают, достигая максимальных значений в диапазоне $l/L=1,4\div 1,7$, после чего они снижаются.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеевский Н.И., Айбулатов Д.Н., Косицкий А.Г. Масштабные эффекты изменения стока в русловой сети территории // География, общество и окружающая среда. Т. VI. Динамика и взаимодействия атмосферы и гидросферы. М.: Городец, 2004. С. 345-412.

Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 456 с.

Завадский А.С., Чалов С.Р., Чернов А.В., Головлев П.П., Морейдо В.М., Беляков П.А. Морфодинамика русел и баланс наносов рек бассейна Селенги (Монголия–Россия) // Эрозия почв и русловых процессов. Вып. 21. М.: Географ. ф-т МГУ, 2019. С. 149-170.

Куракова А.А., Чалов Р.С. Морфология русла и размывы берегов Нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2020. №. 6. С. 41-50.

Куракова А.А., Чалов Р.С. Размывы берегов на широтном участке средней Оби и их связь с морфологией русла // Географический вестник. 2019. № 3(50). С. 34-47.

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.

Петров И.Б. Обь-Иртышская пойма (типизация и качественная оценка земель). Новосибирск: Наука, 1979. 136 с.

Попов И.В. Деформации речных русел и гидротехническое строительство. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 328 с.

Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР). М.: Географ. ф-т МГУ, 1994. 336 с.

Русловые процессы и водные пути на реках Обского бассейна. Новосибирск: РИПЭЛ плюс, 2001. 300 с.

Чалов Р.С., Завадский А.С., Панин А.В. Речные излуины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.

Чалов Р.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Завадский А.С. Особенности рассредоточения стока воды и взвешенных наносов в половодье в раздвоенном русле нижней Оби (в пределах ХМАО-Югры) // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 1. С. 22-33.

Чалов Р.С., Завадский А.С., Камышев А.А., Куракова А.А., Михайлова Н.М., Рулева С.Н. Гидролого-морфологическая характеристика и формирования разветвленного русла нижней Оби (в пределах Ямало-Ненецкого АО) // Изв. РАН. Сер. географ. 2021. Т. 85, № 4. С. 539-553.

Д.М. Лобачева, аспирантка

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ (БЭРОВСКИЕ БУГРЫ И ПАЛЕОПРОТОКИ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ)

(научный руководитель – к.г.н., с.н.с. Бадюкова Е.Н.)

Многочисленные геологические разрезы в уступе долины Нижней Волги активно изучаются длительное время, начиная с конца 19 го века. Анализ литературы и результаты многолетних полевых работ показали, что

во всех изученных разрезах вдоль Нижней Волги (Светлый Яр, Райгород, Черный Яр, Нижнее Займище, Цаган-Аман и пр.) вскрываются мощные толщи осадков нижне- и верхнехазарского возраста, представленных сложным комплексом лиманных, дельтово-морских и морских образований [Krijgsman et al., 2019]. Хазарские отложения перекрыты субазральными супесями, маломощными морскими прибрежными песками и шоколадными глинами, образовавшимися в лагунах, лиманах и эстуариях хвалынского возраста. При этом, аллювий хвалынского времени не обнаруживается ни в одном из разрезов вдоль Нижней Волги [Бадюкова, 2000; Krijgsman et al., 2019]. Из чего следует, что река Волга не протекала на месте современного положения в ранне- и позднехвалынское время. В связи с этим возникает вопрос, где было расположено русло Волги в Северо-западном Прикаспии в Хвалынское время. О прежних течениях Волги и других рек на территории Северного Прикаспия есть ряд упоминаний в работах [Жуков, 1937; Захаров, 1940; Аристархова и др., 1983, Труды прикаспийской экспедиции, 1958 и др.; Четвертичные отложения, 1978].

В хвалынское время русло Волги в нижнем течении разделялось на серию рукавов. По ЦМР (SRTM) космическим снимкам и крупномасштабным топографическим картам видно, что в 50-90 км к востоку от современного русла Волги прослеживается цепочка озер. Среди них соленые озера возле пос. Азгир, Нижний Баскунчак, Балкудук, Асан, Мынтобе. В Хвалынское время урочище Хаки было одним из эстуариев или заливов Северного Каспия, куда вероятно впадали воды одной из крайних восточных проток ПалеоВолги [Леонтьев и др., 1977].

Крайний западный рукав Волги пролегал вдоль подножия склонов Восточных Ергеней, эродировал поверхность морской равнины, в результате чего сформировалась Сарпинско-Даванская ложбина. К настоящему времени ложбина разделена пролювиальными конусами, сформированными временными водотоками со склонов Восточных Ергеней, на ряд замкнутых понижений, занятых озерами или солончаками. Детальный анализ карт и литературы позволил составить подробную геоморфологическую карту, представленную на рис. 1.

На ней, вслед за различными авторами [Жуков, 1937; Труды прикаспийской экспедиции, 1958; Леонтьев, Фотеева, 1965; Николаев, 1957] удалось выявить существование многочисленных разветвленных палеопро-ток и ложбин ранне- и позднехвалынского возраста, простирающихся как в меридиональном направлении, так и в субширотном. Значительная часть палеоврезов начинается в северной части Сарпинской ложбины, расположенной у г. Красноармейска. Некоторые палеопотоки простираются на восток и юго-восток и, судя по топографии, протягиваются через Ахтубу на левый берег Волги и прослеживаются в рельефе далее на ССВ, где многими скважинами вскрываются дельтово-морские отложения, залегающие в понижениях хазарского рельефа [Доскач, 1956]. На правобережье Волги наиболее крупный палеоврез фиксируется между сел Раздольный и Ступино. Ширина серии палеопро-токов достигает здесь 15 км, а глубина вреза около 8-

10 м. Вторая серия меньшей ширины, между сел. Старица и Черный Яр, простирается на ЮЮЗ, сливаясь далее с ложбиной Сарпа (рис. 2).

Между палеопотоками расположены останцовые возвышенности, сложенные аллювиально-морскими отложениями хазарского возраста, строение которых вскрывается вдоль Нижней Волги в изученных разрезах, таких как Светлый Яр, Райгород, Каменный Яр, Соленое Займище, а также вдоль Сарпинской ложбины. Так, в борту балки Ялмата в обнажении, бровка которого около 20 м абс., наблюдается супесчано-алевритовая и глинистая тонкослоистая толща. В целом она достаточно однородная, имеются отдельные маломощные прослои с мелкими раковинами и детритом, а также грубозернистым материалом в виде небольших прослоев и линз. Данная мощная толща сформировалась в авандельтовых и дельтовых флювиальных условиях с повышенной мутностью. Накопление осадка которой шло на фоне постепенного подъема уровня, где скорость подъема была равна скорости накопления осадков, о чем свидетельствует однородность материала [Бадюкова и др., 2021].

Ложбина Даван, которая является продолжением Сарпинской, в южной своей части расширяется до 11 км, отклоняясь на ЮВ. Левый борт выражен в виде резкого обрыва высотой до 8 м, правый борт — длинный и пологий. Окончание ложбины по ее западному борту проследить невозможно, так как он плавно переходит в поверхность, осложненную пологими увалами [Николаев, 1957]. В ложбине протягиваются бэровские бугры с относительной высотой до 8 м и длиной отдельных останцов бугровых комплексов до 5-6 километров. Днище ложбины сливается с обширными такырами, расположенными между буграми. Бэровские бугры здесь представлены в виде останцов, где бугровая толща залегает на шоколадных глинах хвалынского возраста, накопившихся в лагунно-лиманных условиях [Макшаев, 2019]. Последние, в свою очередь, обнажаются в геологических разрезах, что говорит о том, что первоначальный бугровый комплекс рельефа испытал эрозионное воздействие речных водотоков в Даванской ложбине. Из этого следует, что эти водотоки были активны в период после того, как бугры были сформированы, то есть в начале голоцена с наступлением Мангышлакской регрессии. Именно этим можно объяснить незначительную мощность аллювия в ложбине, так как водотоки следовали за отступающим уровнем моря, размывая более древние отложения и бугры. Наши исследования позволяют считать бэровские бугры формами рельефа, изначально образовавшимися на дне обширных, так называемых, пластовых потоков, следовавших из лагуны Северного Каспия в Маныч и далее в Черное море. Лагуна существовала во время спада трансгрессии Каспия в позднихвалыньское время. Изрезанный берег лагуны и несколько береговых линий отступающего моря в значительной мере сохранились в современном рельефе. Следовательно, фиксируемые в долине Даван бугры генетически не связаны с ее формированием, что опровергает гипотезу Жукова о происхождении данных форм [Жуков, 1937].

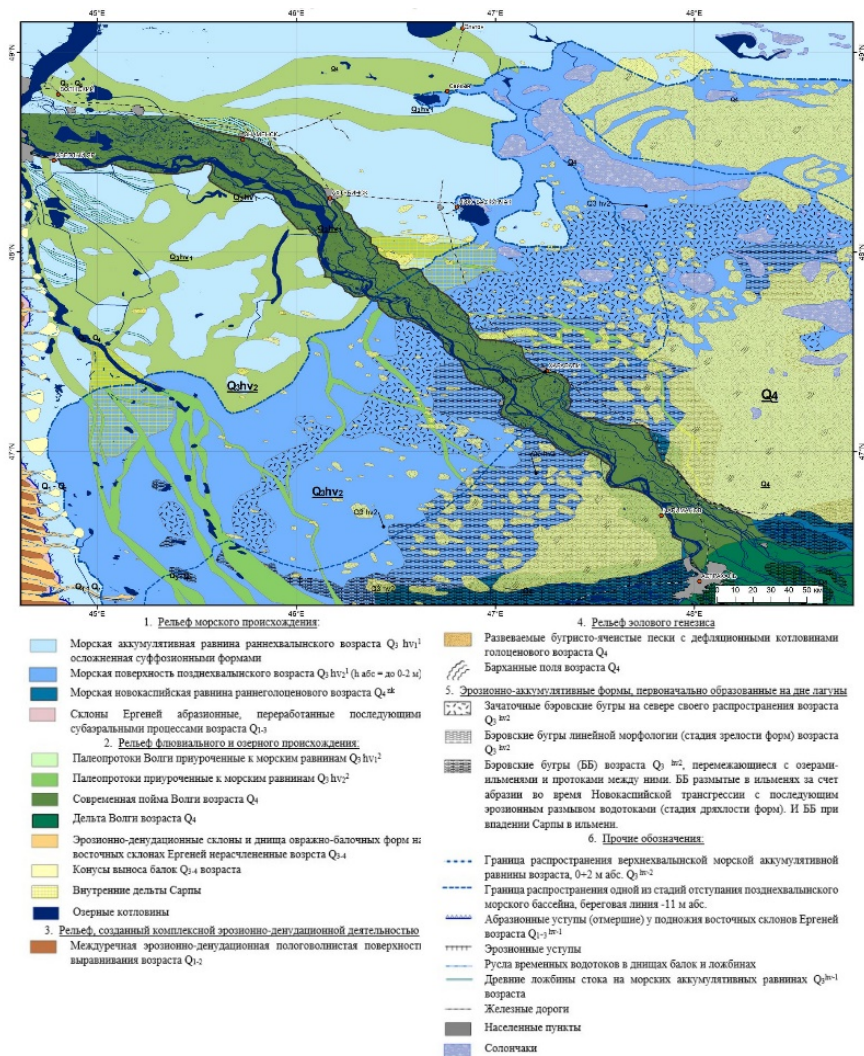


Рис. 1. Геоморфологическая карта Нижнего Поволжья

Аналогичная ситуация наблюдается и в дельте Волги, где волновая активность в ильменях под действием доминирующих восточных ветров привела к существенному изменению рельефа ББ, также своим происхождением не связанных с формированием дельты Волги [Лобачева и др., 2021]. В районе пос. Харабали – Ленино расположен весьма крупный массив грядово-ложбинного рельефа бугров Бэра, простирающихся в направлении на ЗЮЗ. Если посмотреть на рисунок рельефа на правом и левом бортах Волги, то можно отметить его однородность, где рельеф на правом берегу

как бы продолжает рельеф гряд на левом борту. Это, как и отсутствие аллювиальных отложений позднехвалынского возраста, дает основание предположить, что основное русло Волги текло восточнее, а современная долина еще не была сформирована. Ее происхождение связано с падением уровня моря во время Мангышлакской регрессии, т.е. после образования бугров Бэра.

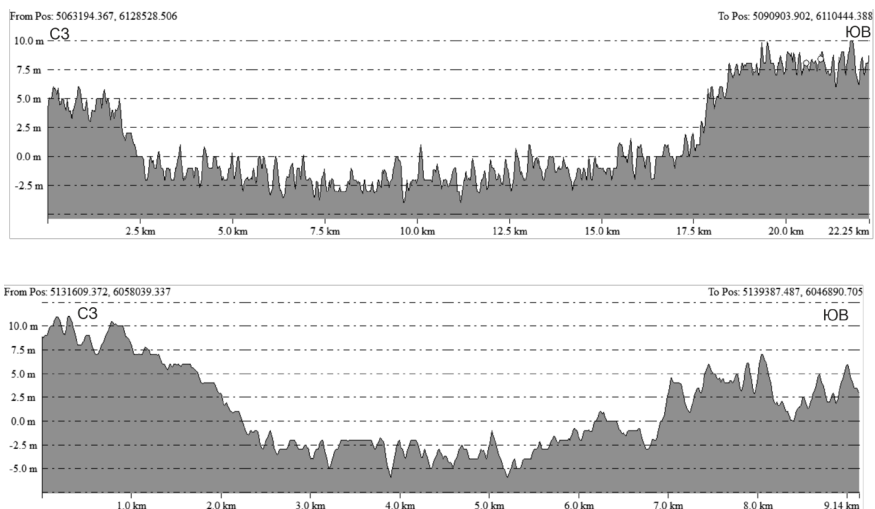


Рис. 2. Поперечные профили через палеопотоки у с. Вязовка сверху и с. Соленое Займище снизу (направление поперек палеопотоки с СЗ на ЮВ)

Необходимо заметить, что сравнительно неизменный рельеф бэровских бугров расположен севернее дельты, где обычно принято рассматривать классическое распространение бугров. Например, в районе Селитренное-Харабали, где на рельеф бугрового комплекса влияли только субаэральные процессы, в основном склоновые, и где эрозия и абразия отсутствовали.

Таким образом, в хвалынское время дельта Волги являлась крупным многорукавным образованием, намного крупнее современной дельты и чем-то напоминала современную дельту Лены по своим размерам (современная ширина дельты Лены составляет 230-260 км). Волга впадала тогда в позднехвалынскую лагуну Северного Каспия и формировала крупную многорукавную дельту выполнения в среднем шириной около 200-210 км.

В позднехвалынское время Волга в своем нижнем течении существовала в виде серии крупных рукавов: на месте современной Волго-Ахтубинской поймы был вероятно небольшой центральный рукав, на западе был Сарпинский рукав, а на востоке Эльтон-Хаккский. Они были соединены между собой обширной сетью рукавов, рельеф которых до сих пор со-

хранился (рис. 2). В самом конце позднехвалынского времени Сарпинский и Хаккский рукава начали отмирать, и большая часть воды стала устремляться по центральному рукаву, формируя современную долину Волго-Ахтубы. О маломощности западного рукава свидетельствует небольшая терраса Сарпы, где мощность аллювия составляет не более 4-5 м. Мощность аллювия в долине Даван составляет 1-3 м. Сарпинско-Даванская ложбина является весьма древним образованием, существовавшим с хазарского времени и отмиравшим в эпохи регрессий Каспия [Николаев, 1957].

ЛИТЕРАТУРА

Аристархова Л.Б., Турикешев Г.Т. Реконструкция позднеплейстоценовой речной сети Прикаспийской низменности // Геоморфология. 1983. №4. С. 62-67

Бадюкова Е.Н. Генезис хвалынских (плейстоцен) шоколадных глин Северного Прикаспия / Бюл. МОИП. Отд. Геология. 2000.Т.75. Вып. 5. С. 25-31.

Бадюкова Е.Н. Происхождение «врезанных» или слепых дельт на Волго-Уральском междуречье в свете новых представлений об истории колебаний уровня Каспия // Геоморфология. 2020 №3. С. 72-83.

Бадюкова Е.Н., Лобачева Д.М., Макишев Р.Р. Изменения местоположения и облика дельты Волги в конце плейстоцена // Пути эволюционной географии 2021. Вып. 2. Мат-лы II Всеросс. науч. конф., посвященной памяти профессора А.А. Величко. Т. 2. М. 2021. С. 25-28.

Доскач А.Г. О генезисе рельефа Волго-Уральского междуречья // Тр. ИГ АН СССР. 1956. Вып. 69. С. 2-36.

Жуков М.М. Геоморфология Северо-западного Прикаспия // Бюлл. МОИП. Отд. Геология. Т. 15, вып. 3, 1937. С. 169-186.

Захаров Л.З. Прошлое Сарпы // Природа, №2, 1940. С. 66-71.

Леонтьев О.К., Фотеева Н.И. Геоморфология и история развития северного побережья Каспийского моря. М.: Изд-во МГУ. 1965. 151 с.

Леонтьев О.К., Маев Е.Г., Рычагов Г.И. Геоморфология берегов и дна Каспийского моря. М., Изд-во Моск. ун-та. 1977. 208 с.

Лобачева Д.М., Бадюкова Е.Н., Макишев Р.Р. Литофациальное строение и условия накопления отложений бэровских бугров Северного Прикаспия // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 6. С. 99-111.

Макишев Р.Р. Палеогеография Среднего и Нижнего Поволжья в эпоху раннехвалынской трансгрессии Каспия / Автореф. дисс. ... канд. географ. наук. – 2019. – 26 с.

Николаев В.А. Сарпинско-Даванская ложбина и ее происхождение // Изв. ВГО. Т. 89. Вып. 4. 1957. С. 333-338

Труды Прикаспийской экспедиции. М.: Изд-во МГУ. 1958. 238 с.

Четвертичные отложения, рельеф и неотектоника Нижнего Поволжья. Изд-во Саратов. ун-та. 1978. 183 с.

Krijgsman, W., Tesakov, A., Yanina, T., Lazarev, S., Danukalova, G., Van Baak, C. G., Agustí, J., Alçiçek, M. C., Aliyeva, E., Bista, D., Bruch, A.,

Büyükeriç, Y., Bukhsianidze, M., Flecker, R., Frolov, P., Hoyle, T. M., Jorissen, E. L., Kirscher, U., Koriche, S. A., Kroonenberg, S. B., Lordkipanidze, D., Oms, O., Rausch, L., Singarayer, J., Stoica, M., van de Velde, S., Titov, V. V., and Weseligh, F. P. Quaternary time scales for the pontocaspian domain: interbasinal connectivity and faunal evolution // Earth-Science Reviews. 2019. 188. 1-40.

Р.А. Медведева, к.г.н., ассистент
Казанский (Приволжский) федеральный университет

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОВРАЖНОЙ СЕТИ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ*

(научный руководитель – д.г.н., проф. О.П. Ермолаев)

Овражная эрозия является серьезной проблемой во многих частях мира, так как представляет собой одну из главных причин деградации почвы. Занимая огромные территории наиболее освоенных в сельскохозяйственном отношении земель, этот эрозионный процесс отличается высокими скоростями развития и большими объемами размываемых и переносимых грунтов [Дедков, 1990]. В этой связи оценка темпов развития оврагов в разных климатических условиях и в разных условиях землепользования по-прежнему остается важным аспектом прогнозирования влияния эрозии на окружающую среду.

Крупномасштабное картографирование современного овражного расчленения в степных ландшафтах востока Русской равнины проводилось для территории Саратовской области (100200 км²) путем визуального дешифрирования наиболее качественных современных RGB-изображений местности высокого и сверхвысокого разрешения (2016-2020 гг.), предоставленных ресурсом "Nokia", "Bing" в программе "SAS.Планета".

Важным этапом работ являлось формирование системы дешифровочных признаков. К ним относятся: а) плановая форма оврага, имеющая хорошо различимые границы; б) линейный и дендритообразный рисунок изображения с четко выраженной бровкой и тальвегом; в) косвенные признаки (тени, позволяющие идентифицировать поперечный профиль оврага); цвет и тон изображения – для детектирования обнаженных участков склона овражных форм. Выявлена также зависимость четкости отображения оврага на космическом снимке от цвета пород, в которых возник эрозионный врез. Надежно дешифрируются формы, имеющие тон изображения от светло-серого до почти белого за счет эрозионного врезания в карбонатно-кремнистые, известняковые, мел-мергельные горные породы. Для идентификации оврагов на пограничных стадиях их развития были определены критерии, позволяющие исключить из дешифрирования собственно промоины, которые отличаются от овражной формы глубиной и шириной: менее 1,5 м и 3 м соответственно. На снимках чаще используется критерий

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект 22-17-00025)

ширины линейного размыва. Такой порог в размерности, нам представляется достаточно надежным. При меньшей ширине и глубине размывов эти линейные формы относятся уже собственно к промоинам и, как правило, запахиваются сельскохозяйственной техникой при обработке. Также при глубине более 1,5 м склоновые потоки полностью дренируют все почвенные горизонты и вскрывают материнскую породу (четвертичные и коренные отложения). Балочные формы имеют плохо выраженную бровку, трапециевидный поперечный профиль, заросшие луговой и древесно-кустарничковой растительностью склоны, а устье и вершина определяется не четко [Ермолаев и др., 2017]. Овраги были разделены по происхождению на первичные (склоновые и береговые) и вторичные (донные) овраги. К склоновым оврагам отнесены линейные формы длиной более 70-80 м и глубиной – свыше 1,5 м, имеющие хорошо выраженный водосбор и выходящие за бровку берегового уступа на склоны бассейнов. Короткие овраги, сформировавшиеся на бортах речных долин, определялись как береговые. Вторичные врезы в днищах балочных форм и логов относились к донным оврагам.

Результатом визуального дешифрирования всех овражных форм на территории Саратовской области является впервые созданный векторный слой тальвегов оврагов, который содержит 17628 линейных объектов, а также данные по их типу (склоновые, береговые, донные). Проверка топологии слоев и исправление геометрических ошибок осуществлялось в программе "Easy Trace".

В качестве операционно-территориальных единиц для картографического отображения овражности взята векторная карта бассейнов малых рек [<http://bassepr.kpfu.ru>]. Для каждого бассейна (всего 704) вычислена суммарная протяженность овражной сети (м). Степень овражного расчленения территории определялась по наиболее часто используемым показателям: густоте (суммарная протяженность оврагов, отнесенная к единице площади – $\text{м}/\text{км}^2$) и плотности (количество вершин оврагов на единицу площади – $\text{ед.}/\text{км}^2$).

По результатам исследования суммарная протяженность овражной сети на территории Саратовской области составила 1570 км, где средняя длина объекта – 92 м. Из всех овражных форм преобладающее большинство относится к склоновому типу – 88%. Береговые овраги составили 9% от общего числа оврагов. На донные овраги приходится 3%. Среднее значение густоты оврагов составляет $20,5 \text{ м}/\text{км}^2$. Максимальные значения отмечаются в пределах Приволжской возвышенности вдоль правого берега Волги (рис. 1).

На территории Правобережья Саратовской области преобладающее большинство бассейнов характеризуются значениями густоты оврагов $20-500 \text{ м}/\text{км}^2$. Минимальные значения густоты оврагов от 0 до $5 \text{ м}/\text{км}^2$ имеют большинство речных бассейнов Заволжья. В пространственном распределении плотности оврагов отмечается сходство с распределением показателя густоты оврагов. Среднее значение плотности оврагов составляет $0,2 \text{ ед.}/\text{км}^2$, достигая максимума $5,2 \text{ ед.}/\text{км}^2$. Эти результаты согласуются с ранее полученными данными по овражной эрозии в Татарстане, Чувашии и Ульяновской области. Большинство речных бассейнов с интенсивной овражной

эрозией расположены на Приволжской возвышенности в пределах республик Чувашия и Татарстан.

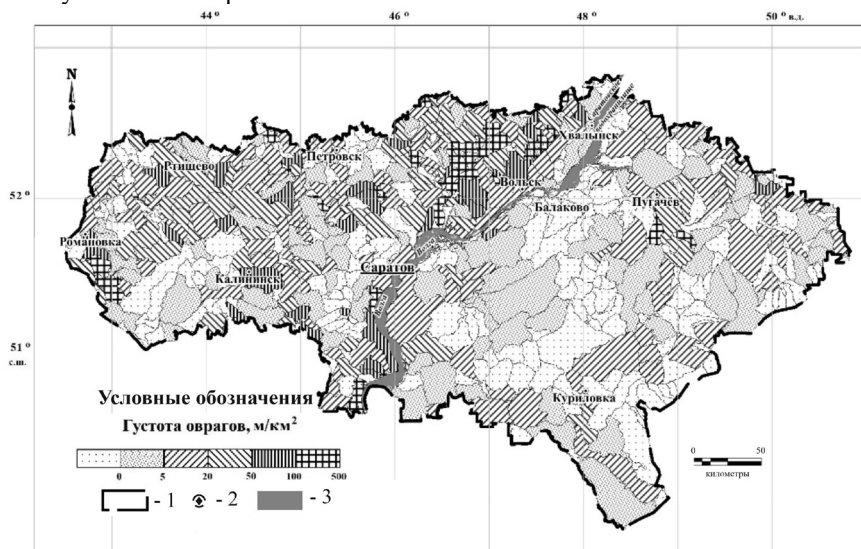


Рис. 1. Густота современной овражной сети на территории Саратовской области.

1 – граница Саратовской области, 2 – населенные пункты, 3 – водные объекты

Методом корреляционного анализа была оценена связь густоты оврагов с рядом природно-антропогенных характеристик изучаемых бассейнов (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициент корреляции густоты оврагов с природно-антропогенными характеристиками территории исследования (n = 363; p < 0,05).

Показатели	Коэффициент корреляции
Распаханность (%)	-0,3
Лесистость (%)	0,2
Залуженность (%)	0,2
Средняя крутизна склонов (град.)	0,4
Модуль стока воды (м ³ /сек*м ²)	0,2
Годовой слой стока воды (мм)	0,3

Прямая и наиболее сильная связь среди выбранных характеристик установлена между показателями густоты оврагов и средней крутизной склонов. Из-за сильного овражного расчленения процент распаханности данных территорий низкий, поэтому наблюдается обратная связь между распаханностью и густотой овражной эрозии. Между узкими и длинными оврагами образуются широкие межовражные участки, занятые лугами. Это обуславливает прямую связь между залуженностью территории и густотой оврагов.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Систему дешифровочных признаков составляют общие и специфические признаки оврагов. К общим признакам относятся четкость бровки и тальвега, линейный и дендритообразный рисунок. Специфические признаки отражают особенности изучаемой территории. Для Саратовской области такими признаками являются незадернованные склоны оврагов в мелочных отложениях, находящиеся в «законсервированном» состоянии без следов активного роста.

2. Выявленные территории с сильной и очень сильной овражной эрозией требуют особого внимания и организации геоэкологического мониторинга для предотвращения деградации почв и сельскохозяйственных угодий. Впервые созданный векторный слой тальвегов оврагов может стать основой для организации мониторинга на территории Саратовской области.

3. Приволжская возвышенность в пределах Саратовской области, также как и на ранее изученных территориях, характеризуется максимальными значениями густоты и плотности оврагов.

ЛИТЕРАТУРА

Дедков А.П. Экзогенное рельефообразование в Казанско-Ульяновском Поволжье. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1970. 256 с.

Овражная эрозия востока Русской равнины. Казань: Казанский ун-т, 1990. 140 с.

Ермолаев О.П., Медведева Р. А., Платончева Е.В. Методические подходы к мониторингу процессов эрозии на сельскохозяйственных землях Европейской части России с помощью материалов космических съемок // Уч. зап. Казанск. ун-та. 2017. Т. 159. № 4. С. 668-680.

Речные бассейны Европейской части России. <http://bassepr.kpfu.ru/>.

А.А. Мироненко, аспирант¹

Е.П. Рец, к.г.н., с.н.с.²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,*

²*Институт водных проблем РАН*

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ МАКСИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ КАК ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПАСНОСТИ НАВОДНЕНИЙ НА РЕКАХ СЕВЕРНОГО КAVКАЗА *

(научный руководитель – д.г.н., проф. Н.Л. Фролова)

Проведен анализ изменчивости максимальных годовых срочных уровней воды, наблюдаемых на 59 гидрологических постах рек Северного Кавказа за период 1961-2017 гг. Гидрологические посты, у которых осуществлен перенос нуля графика поста, посредством переходных значений приведены к

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-35-90120).

однообразию рядов. В случае, если гидрологический пост был перенесен, но переходные коэффициенты отсутствуют, ряд не рассматривался в ходе дальнейшего анализа. В качестве переломного в рядах наблюдений выбран 1990 год в соответствии с руководящими указаниями ВМО по расчету климатических норм [Всемирная метеорологическая организация, 2017] и результатами применения Pettitt-теста [Pettitt, 1979]. Таким образом, в исследовании сопоставлены характеристики двух периодов – с 1961 по 1990 и с 1991 по 2017 гг. К рядам также применены и другие статистические критерии при уровне значимости $\alpha=0,05$. Непараметрические критерии согласия (Колмогорова-Смирнова и хи-квадрат Пирсона) определили высокую степень достоверности аппроксимации рассмотренных рядов максимальных уровней воды смешанным гауссовским распределением и распределением Джонсона семейства SB. К гидрологическим рядам также применены параметрические критерии однородности (Стьюдента и Фишера).

Проведено исследование повторяемости превышений отметок опасных¹ и неблагоприятных² явлений (далее – ОЯ и НЯ соответственно), позволяющих сделать выводы об угрозе и масштаба затопления территории, по данным 44 гидрологических постов на реках Северного Кавказа за период 1961-2017 гг. Для этого максимальные годовые срочные уровни воды сопоставлены с отметками ОЯ и НЯ, определено число и повторяемость превышений отметок ОЯ и НЯ за рассматриваемый период.

Статистический анализ гидрологических рядов максимальных уровней воды обнаружил нарушение однородности по математическому ожиданию на 25 из 59 постов, на каждом из которых наблюдается его рост от 1961-1990 к 1991-2017 гг. Этот факт подкрепляется и данными о том, что на большинстве метеорологических станций Северного Кавказа, где критерием Стьюдента для периода 1966-2012 гг. зафиксировано статистически значимое нарушение однородности абсолютных величин экстремальных осадков преимущественно ливневого генезиса [Чернукульский и др., 2018], наблюдается увеличение данных характеристик, особенно в летний период [Золина, Булыгина, 2016]. Исследование однородности рядов максимальных уровней воды по дисперсии не позволяет сделать какие-либо однозначные выводы, поскольку на территории Северного Кавказа преобладают гидрологические посты, где нарушение однородности рядов статистически незначимо – 44 поста из 59. Для 13 постов из 15 с нарушением однородности характерно увеличение дисперсии от 1961-1990 к 1991-2017 гг.

Превышение отметок ОЯ за период 1961-2017 гг. обнаружено на 37 гидрологических постах из 44: повторяемость превышения здесь колеблется в диапазоне от 1,8 до 88,6%. Отметки НЯ превышены на 42 из 44 гидроло-

¹ Опасные явления (ОЯ) - явления, которые способны нанести значительный материальный ущерб или представляют угрозу жизни и здоровью людей [Федеральный закон..., 1998].

² Неблагоприятные явления (НЯ) - явления, не достигшие уровня ОЯ, но существенно затрудняющие деятельность отдельных отраслей хозяйства и наносящие ущерб населению и экономике [Федеральный закон..., 1998].

гических постов. Повторяемость превышения за период составляет 1,9-93,2%. Наиболее опасными с точки зрения превышения отметок ОЯ и НЯ являются районы, прилегающие к участкам рек бассейна Кубани и рекам Черноморского побережья, что вызывает сильное беспокойство за местное население. Более того, зафиксировано увеличение повторяемости превышений отметок НЯ и ОЯ от 1961-1990 к 1991-2017 гг. на 24 и 26 гидрологических постах соответственно.

В рамках исследования проведен анализ изменчивости максимальных годовых срочных уровней воды рек Северного Кавказа как основного индикатора опасности наводнений. Помимо статистического анализа гидрологических рядов, выполнено их сопоставление с отметками ОЯ и НЯ. Показано, что на фоне статистически значимого роста математического ожидания максимальных уровней воды от 1961 к 2017 г., высока степень повторяемости превышений отметок ОЯ и ОЯ, в последние десятилетия имеющая тенденцию к увеличению на преобладающем числе гидрологических постов на реках Северного Кавказа.

ЛИТЕРАТУРА

Всемирная метеорологическая организация. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. Электрон. журн. ВМО № 1203. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4168.

Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // *Фундамент. приклад. климатология*. 2016. Т. 1. С. 84–103.

Федеральный закон “О гидрометеорологической службе” от 19 июля 1998 г. № 113-ФЗ.

Чернукульский А.В., Козлов Ф.А., Золина О.Г., Булыгина О.Н., Семёнов В.А. Климатология осадков разного генезиса в Северной Евразии // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 7. С. 5–18.

Pettitt A.N. A Non-Parametric approach to the changepoint problem // *J. Royal Statistical Society. Ser. C (Applied Statistics)*. 1979. V. 28. № 2. P. 126–135.

А.В. Мищенко, инж.-исс.

В.Н. Щепотьев, к.с.-х.н., н.с.

Почвенный институт им. В.В. Докучаева

15-ЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ «КАРАНТИНА» ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ*

(научный руководитель – к.г.н., в.н.с. А.П. Жидкин)

Эрозия почв многие десятилетия является актуальной проблемой, приводящей к деградации почвенного покрова, снижению урожайности и качества сельскохозяйственной продукции. Актуальными представляются

* Исследование выполнено по теме госзадания № 0439-2022-0015

вопросы разработки эффективных противоэрозионных мероприятий, а также оценка влияния данных мероприятий на свойства почв и длительность данных эффектов.

Для изучения данного вопроса на стационаре «Богословский» Почвенного института им. В.В. Докучаева были организованы специальные работы по организации противоэрозионных мероприятий и мониторингу почвенных свойств. Результаты мониторинга за 2000-2006 годы опубликованы в работе [Извеков, 2012]. В данной статье рассматривается динамика за 2007-2019 (2020) гг. следующих показателей: плотность, коэффициент структурности, коэффициент водоустойчивости.

Мониторинг осуществлялся на пяти площадках площадью 30 м², были описаны опорные разрезы и диагностирована степень эродированности по «Классификации и диагностике почв СССР» для серых лесных почв [Егоров, Фридланд, Иванова и др., 1977] и далее отбор образцов для анализа проводился в слое 0-50 см с шагом в 10 см. Плотность определялась буром в поле, агрегатный состав по методу Савинова воздушно-сухой почвы: 10; 7; 5; 3; 2; 1; 0,5; 0,25 мм, и водопрочность просеиванием в стоячей воде на колонке сит 5; 3; 2; 1; 0,5; 0,25 мм. Визуализация данных осуществлена в программе Origin с помощью построения контурных графиков методом триангуляции, значения для 10 см слоя указывались для его середины: 5, 15, 25, 35, 45 см глубины.

Время наблюдений было разделено на три этапа: 2007-2013 “карантин эрозии”, когда проводился постоянный контроль гидротехнических сооружений, 2013-2016 “переходные” – контроль за сооружениями был не постоянный и 2017-2020 “традиционный” – распашка участка на два поля без гидротехнических сооружений.

Опытные поля стационара «Богословский» расположены на склонах северо-западной и западной экспозиции, а также частично на высокой пойме р. Беспуты (правый приток Оки в ее среднем течении) в пределах северного склона Среднерусской возвышенности. Рельеф образован крупноувалистыми эрозионными формами с абсолютными высотами, до 200 м. Уклоны местности на опытном стационаре от 1-2° верхней части до 4-5° в нижней, перед балкой. Почвообразующие породы – покровные лессовидные суглинки (на склоне) и пойменный аллювий. На опытном участке преобладают серые лесные слабо- и среднесмытые почвы. По мере увеличения крутизны склона (до 5°), на отдельных полях был смыт весь гумусовый горизонт и пахотный слой сформирован из иллювиального горизонта В.

В 1995-1998 гг. на стационаре были проведены работы по коренной реконструкции поверхности земельного участка. Использовались землевание, чизелевание, плантаж и глубокая вспашка до 40 см, для выравнивания и сглаживания поверхности пашни, и заполнения ложбинных форм на склоне. По завершении мелиоративных работ проведен уравнительный посев зерновых культур.

С 1999 г. на стационаре была создана модель почвозащитной системы земледелия на склоновых эродированных агросерых почвах, их ис-

пользованию и адаптации к современным условиям ведения сельского хозяйства на основе ландшафтного подхода [Извеков, 2012]. Она составила минимально необходимый комплекс почвозащитных мероприятий по регулированию поверхностного стока, предотвращения смыва почвы и создания условий для воспроизводства почвенного плодородия смытых почв.

В период с 1999 по 2015 год поля использовались ежегодно для возделывания зерновых и многолетних трав в соответствии со структурой севооборота направленной на повышение продуктивности и сохранения плодородия эродированных почв, т.е. отдельные поля севооборотов находились без механической обработки, под травами, от 2 до 5 лет.

В 2017 году выполнена реконструкция организации территории участка. Проведено увеличение размеров и изменение границ полей с выделением на склоне двух севооборотов – верхнего и нижнего, занимающих соответствующую часть склона и разделенных в середине склона лесополосой. На полях севооборотов представлены агрономические фоны, характерные для производственных условий зоны – зерновые культуры, пар и многолетние травы.

Для оценки структурного состояния почвы используют коэффициент структурности ($K_{стр}$) $K_{стр}=(\Sigma(0,25\text{мм}-10\text{мм})) / (>10\text{мм} + <0,25\text{мм})$ [Шейн, 2005]. Диапазоны $K_{стр}$, используемые для качественной оценки структуры, составляют: $>1,5$ – отличное агрегатное состояние; $1,5-0,67$ – хорошее; $<0,67$ – неудовлетворительное. Для оценки водоустойчивость структуры почв используют количество агрегатов $>0,25$ мм. Диапазоны водоустойчивости структуры по сумме агрегатов размерами $>0,25$ мм: $<30\%$ – неудовлетворительная; $30-40$ – удовлетворительная; $40-75$ – хорошая; $>75\%$ – избыточно высокая.

За период 2007-2013 гг. “карантина эрозии” происходило улучшение структуры почвы на всех пяти точках наблюдений (рис. 1): с неудовлетворительной до хорошей в слое 15-30 см у сильно эродированной почвы и средне эродированной поле 4/3, на других полях структура достигла отличной оценки. За 2013-2016 гг. в пахотном слое (0-20 см) структура оставалась отличной или хорошей, но начались изменения, ведущие к ухудшению структуры. С 2017 г. после сплошной распашки $K_{стр}$ имеет высокие значения, но это может быть вызвано механическим разрушением глыб орудиями. По показателю водоустойчивости структура всех почв хорошая, а избыточная водоустойчивость у сильноэродированной почвы может быть связана с припахиванием горизонта В (ВТ).

Анализ динамики плотности почв показал (рис. 2), что за период 2007-2013 “карантина эрозии” произошло снижение плотности пахотного слоя с $1,3-1,4$ г/см³, сильно уплотнённая пашня по Н. А. Качинскому, до $1,1-1,2$ г/см³. В годы пара и возделывания зерновых, т.е. активных обработок плотность составляла $1,1-1,0$ г/см³. Значение $1,2$ г/см³ характерно для уплотненной пашни, но плотность была стабильна на таком значении под многолетними травами. При этом за всё время наблюдений плотность па-

значительно снизить деградацию слабо- и средне эродированных почв, а также улучшить структурное состояние на сильноэродированных участках.

ЛИТЕРАТУРА

Извеков А. С., Щепотьев В. Н. Нетрадиционный подход к использованию эродированных склоновых агросерых почв в земледелии Нечерноземья России // *Агрофизика*, 2012. № 4(8). С.45-59

Егоров В. В. В. М. Фридланд, Е. Н. Иванова и др. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.

Шеин Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 432 с.

М.С. Осипова, студент

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЧВ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ СМЫТОСТИ И НАМЫТОСТИ НА КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКАХ НА СРЕДНЕРУССКОЙ И ДОНО-ДОНЕЦКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТЯХ

(научный руководитель – к.г.н., в.н.с. А.П. Жидкин)

Эрозионно-аккумулятивные процессы (ЭАП) оказывают существенное влияние на свойства почв и структуру почвенного покрова распахиваемых территорий. Под их действием происходит формирование особых эрозионно-аккумулятивных структур, состоящих из почвенных комбинаций эродированных и намывных почв [Глазовская, Фридланд, 1978]. Картографирование данных структур позволяет получить данные о текущем состоянии почвенного покрова, а также спрогнозировать его дальнейшую эволюцию под влиянием ЭАП. На сегодняшний день крайне мало работ, посвященных изучению и картографированию эрозионно-аккумулятивных структур (ЭАСПП), большая часть исследований направлена на моделирование и анализ темпов смыва и аккумуляции, что не решает всех научных задач в полной мере.

Термин «эрозионно-аккумулятивная структура почвенного покрова» не является широко используемым в литературе, однако встречается в ряде важных для отечественного почвоведения научных работ [Фридланд, 1972; Глазовская, 2000].

В настоящее время появление новых технологий позволяет расширять возможности применения, как используемых материалов, так и методов картографирования почв, что позволяет увеличивать точность картографирования эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова. Целью данной работы являлось изучение ЭАП и их влияния на формирование особых структур почвенного покрова ключевых участков в пределах Среднерусской и Доно-Донецкой возвышенностей соответственно.

В качестве первого объекта исследования был выбран малый сельскохозяйственный водосбор «Спокоевка» в Курской области. Он расположен в северной части лесостепной зоны на границе с широколиственными лесами в пределах бассейна р. Воробжи, левобережного притока р. Сейм. Общая площадь водосбора составляет 84 га, из которых 75 га заняты пашнями. Территория исследования относится к юго-западному склону Среднерусской возвышенности. Рельеф представлен возвышенной слабоволнистой равниной. Почвообразующими породами выступают лёссовидные суглинки. Климат территории умеренно континентальный со среднегодовым количеством осадков 426-895 мм [<https://rp5.ru/>]. Почвенный покров представлен черноземами типичными. Земледельческое освоение данного региона началось в середине XVIII века.

В качестве второго объекта исследования были выбраны несколько сельскохозяйственных полей в Ростовской области, в пределах бассейна р. Большая, левобережного притока р. Калитва. В рельефе территории преобладают холмисто-гребневый рельеф Доно-Донецкой возвышенности. Почвообразующими породами выступают карбонатные лёссовидные суглинки. Климат территории умеренно континентальный со среднегодовым количеством осадков около 250-420 мм [<https://rp5.ru/>]. Почвенный покров представлен каштановыми типичными почвами. Земледельческое освоение данного региона началось со второй половины XIX века [Шишкина, 2017].

Исследование темпов и пространственного распространения эрозии и аккумуляции почв проводилось с помощью комплекса методов.

Для математического моделирования темпов ливневой эрозии и аккумуляции была использована модель WaTEM/SEDEM [Notabaert and ect. 2006]. Модель WaTEM/SEDEM учитывает взаимодействие между эрозионным потенциалом дождей осадков, эродированностью почв, эрозионным индексом возделываемых культур в среднемноголетнем севообороте и особенностями рельефа. Верификация полученных результатов проводилась на основе почвенно-морфологического метода.

Почвенно-морфологический метод основан на сопоставлении мощностей гумусовых горизонтов почвенных профилей на участках, подверженных воздействию эрозионно-аккумулятивных процессов, и на ненарушенных территориях, которые берутся за эталонные [Егоров, 2009].

Одними из главных входных параметров являлись мощности A1B и содержания гумуса в точках опробования. Для разделения имеющихся точек по категориям степени смытости использовались две классификации: для гумуса – классификация М. Н. Заславского [1983 года], для мощности гумусового горизонта A1B – классификация почв СССР [1977 года]. За эталон были взяты средние значения для точек на приводораздельной части территорий: гумус – 6,1%, мощность A1B – 69,4 см (Спокоевка) и гумус – 3,7% (Морозовск).

Для экспертного анализа использовались спутниковые снимки в программе Google Earth Pro, по которым были выделены светлые участки – почвы разной степени смытости. В работе были использованы полученные

сотрудниками лаборатории почвенной информатики Почвенного института им. В.В. Докучаева результаты инновационного метода расчета отражательной способности почв [Королёва и др., 2017] участка Морозовск на основе большого массива данных дистанционного зондирования. Развитие новых технологий, в частности искусственного интеллекта, и появление глубокого машинного обучения позволили решить проблему обработки больших массивов данных дистанционного зондирования. В данном случае растр является отображением структуры почвенного покрова, которое формируется за счет таких показателей отражательной способности почв, как цвет почв, а соответственно её гумусированности, минералогического и гранулометрического состава.

Картографирование эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова проводилось визуально-экспертным методом на основе комплексного использования результатов математического моделирования темпов смыва и аккумуляции, почвенно-морфологического методов и анализа ДДЗ.

На участке «Спокоевка» отмечается высокое варьирование значений мощностей гумусовых горизонтов (A1B): от 40 до 250 см. Наибольшие значения характерны для точек опробования, расположенных в днище балки: от 190 до 250 см, что является следствием активного протекания аккумулятивных процессов. Наименьшие – для точек, находящихся на склонах вне ложбин (от 40 до 90 см), что говорит об эродированности данных почв. В точках, находящихся в пределах ложбин, отмечаются мощности A1B от 70 до 120 см, что свидетельствует об аккумуляции. На границе пашни у лесополос отмечается высокое варьирование значений: от 40 до 135 см.

Содержание гумуса в верхних 40 см почв исследуемого участка варьируется в пределах от 4,8 до 7,0%.

Результаты математического моделирования свидетельствуют об относительно высоких темпах перераспределения почвенной массы процессами водной и механической эрозии (около 10 т/га в год). Особенно высоки темпы ливневой эрозии почв в верховье левого отвешка балки (более 20 т/га в год). Аккумуляция наносов в пределах пашни приурочена преимущественно к нижним и средним частям распахиваемых днищ ложбин, а также к нижним участкам склонов на границе пашни и задернованных бортов в верховьях отвешков благодаря наличию лесополос.

Суммарно темпы всей водной эрозии по расчетам WATEM/SEDEM составили 944 тонн/год, что достаточно близко с результатами почвенно-морфологического метода (792 тонн/год). При этом внутри водосбора аккумулируется около 86% от общего объема мобилизованного почвенного вещества (809 т/год), а выносится за пределы водосбора – около 14% (136 тонн/год).

Эрозионные процессы сформировали древовидный ландшафтный рисунок территории. Наибольшая часть смытых почв склонов приурочена к верховьям левого и правого отвешков балки. Площадь эродированных почв составила около 35% от всей площади водосбора. При этом на средне-

смытые почвы пришлось примерно 14% территории от всего водосбора, а на слабосмытые – 21%.

На основе вышеупомянутого комплекса методов визуально-экспертным способом была построена интегральная карта эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова участка «Спокоевка» (рис. 1А). Структуры представляют собой почвенные комбинации, состоящих из почв разной степени смытости или намытости. Для этого было выделено 6 почвенных комбинаций: Э0 – неэродированные почвы с возможным участием слабосмытых почв; Э1 – слабоэродированные с преобладанием слабосмытых почв; Э2 – среднеэродированные с преобладанием среднесмытых почв; СН – смыто-намытые; Н1 – слабонамытые; Н2 – сильнонамытые. Также отдельно были выделены не почвенные образования в виде транзитной зоны, через которую проходит значительная часть наносов, но они не аккумулируются, и не происходит смыва гумусового горизонта, а также участки, занятые под дороги.

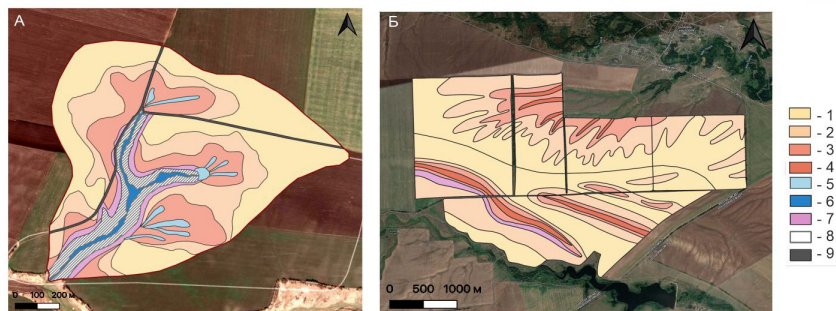


Рис. 1. Эрозионно-аккумулятивные структуры почвенного покрова на ключевых участках в пределах: А – Среднерусской возвышенности, Б – Доно-Донецкой возвышенности.

Группы почв: 1 – Э0, 2 – Э1, 3 – Э2, 4 – Э3, 5 – Н1, 6 – Н2, 7 – СН, 8 – Т, 9 – дороги

Полученная карта имеет характерный древовидный рисунок почвенного покрова. Наименьшую площадь от всего водосбора занимают группы слабо- и сильнонамытых почв, приуроченных к распахиваемым ложбинам и днищу главной балки соответственно. Смыто-намытые почвы занимают прилежащие к границе пашни области с высоким варьированием мощности гумусовых горизонтов общей площадью около 2% от всего водосбора. Наибольшую часть территории занимают неэродированные почвы приводораздельных участков с незначительной долей слабосмытых почв. Остальную территорию распахиваемых склонов примерно поровну делят слабоэродированные (темпы смыва от 5 до 10 т/год) и среднеэродированные почвы (темпы смыва более 10 т/год). Примерно 7% площади водосбора –

транзитная зона, приуроченная к не распахиваемым бортам балки и территории лесополосе.

Для почв участка Морозовск характерна высокая контрастность содержания гумуса в верхних 25 см почв: от 1,1 до 5,1%. Для точек опробования приводораздельных участков и пологих склонов характерны примерно схожие значения содержания гумуса в среднем около 3,7%. Для почв на гребнях значения несколько ниже и сопоставимы с результатами, полученными для точек на склонах средней крутизны: около 2,6-2,8% гумуса. Наименьшее содержание гумуса обнаружено в точках на крутых склонах южной экспозиции: в среднем – 1,9%, а минимальное значение – 1,1%, что свидетельствует о высокой степени эродированности почв в данной позиции рельефа. Наибольшее содержание гумуса характерно для точек в ложбинах.

Средние темпы смыва по расчетам модели WATEM/SEDEM составили примерно 4,5 т/год. Особенно высокие темпы ливневой эрозии почв (более 20 т/га в год) характерны для крутых склонов южной экспозиции. Аккумуляция наносов в северных частях с/х полей не образует каких-либо чётких зон, что может быть связано с тем, что размер ячейки ЦМР (30х30 м) больше, чем размер зон аккумуляции. В южных частях полей аккумуляция характерна для нижних частей склонов. Суммарные объемы водной эрозии составили 5960 т/год. При этом в пределах пашни аккумулируется около 2560 т/год (43% от всего объема мобилизованного почвенного вещества), а выносятся за пределы пашни – около 57%, то есть 3400 т/год.

Анализируя карту отражательной способности открытой поверхности почв, которая характеризует структуры почвенного покрова, можно сказать, что они в северной части участка сильно отличается от южной части. Северная часть участка характеризуется древовидным рисунком ареалов почв разной степени смытости и намытости. В свою очередь, южная часть имеет совершенно не древовидную структуру, а достаточно широкие и очень длинные (несколько километров) зоны эродированных почв в виде полос.

На основе вышеперечисленных методов была построена интегральная карта эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова (рис. 1Б). Структуры представляют собой почвенные комбинации, состоящих из почв разной степени смытости или намытости. В отличии от участка Спокоевка, для участка Морозовск было выделено 5 почвенных комбинаций: Э0, Э1, Э2, СН и Э3 – сильноэродированные с преобладанием сильносмытых почв.

Карту эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова участка Морозовск можно условно разделить на 2 части: северную и южную. Для северной части характерен древовидный рисунок почвенного покрова. Неэродированные почвы с возможным участием слабосмытых почв приурочены к приводораздельным участкам, слабо- и среднеэродированные – к склонам разной крутизны. Сильноэродированные с преобладанием сильносмытых почв для данного типа рисунка характерны для бортов ложбин.

В свою очередь, южная часть отличается особыми линейными структурами почв разной степени эродированности, которые были диагностированы всеми используемыми методами. Неэродированные почвы с возможным участием слабосмытых почв приурочены к приводораздельным областям и пологим склонам. Группа слабоэродированных с преобладанием слабосмытых почв занимают пологие склоны и склоны средней крутизны северной экспозиции, а среднеэродированные с преобладанием среднесмытых почв – крутые склоны и гребни гряд. Небольшую площадь территории имеют сильноэродированные с преобладанием сильносмытых почв, при этом они приурочены к крутым склонам южной экспозиции. И самую малую площадь занимают смыто-намытые почвы, которые расположены в пределах некоторых нижних частей пологих склонов южной экспозиции.

Главным образом ЭАСПП на рассматриваемых возвышенностях отличаются формой и составом почвенных ареалов.

По форме в пределах ключевых участков можно выделить 3 ЭАСПП: древовидную на Среднерусской возвышенности, мелкодревовидную и линейную на Доно-Донецкой возвышенности. Главным образом ЭАСПП отличаются формой и составом почвенных ареалов. Первостепенную роль в образовании той или иной формы почвенных ареалов под воздействием эрозионно-аккумулятивных процессов играет рельеф. И на Среднерусской, и на Доно-Донецкой возвышенностях наличие хорошо выраженной овражно-балочной сети, формирует древовидные формы. Однако за счет наличия увалистых гряд в пределах Доно-Донецкой возвышенности в южной части ключевого участка формируются линейные вытянутые формы.

Достаточно сильно ЭАСПП отличаются по своему составу почвенных ареалов. Для ЭАСПП на Среднерусской возвышенности характерно наличие смыто-намытых, слабо- и сильнонамытых почв, в то время как на Доно-Донецкой возвышенности выделяются только смыто-намытые почвы. Важным отличием является большая степень эродированности почвенного покрова на Доно-Донецкой возвышенности в целом, поскольку в нем присутствуют сильноэродированные почвы.

Однако есть и сходства. Во всех ЭАСПП в качестве доминантной почвы, то есть «фона» выступает зональный подтип почвы с отсутствием признаков эродированности или намытости. При этом их площадное соотношение относительно общей площади составляет около 40-50%.

Основные выводы.

Главным фактором дифференциации почвенного покрова исследуемых территорий являются ЭАП, под влиянием которых сформировались различные структуры почвенного покрова.

Отмечается высокое соответствие модельных расчетов и полевых методов количественной оценки ЭАП по объему миграции и аккумуляции почвенного вещества, а также соответствие модельных расчетов и про-

странственного рисунка эродированных почв с ДДЗ и почвенно-морфологических обследований. Однако оно неабсолютное, что обусловлено комплексностью и контрастностью почвенного покрова территорий.

На территории участка на Среднерусской возвышенности сформировался древовидный рисунок из почвенных комбинаций агрочерноземов разной степени смытости и намытости.

На территории участка на Доно-Донецкой возвышенности в северной части сформировался мелкодревовидный рисунок из почвенных комбинаций агрокаштановых почв разной степени смытости, а в южной части – линейные почвенные комбинации из сильно-, средне- и слабоэродированных, а также из смыто-намытых почв.

Таким образом, на основе сочетания традиционных и современных цифровых методов картографирования ЭАП и эродированности почвенного покрова удалось более обоснованно и достаточно детально построить карты эрозионно-аккумулятивных структур почвенного покрова, что показывает перспективность развития данного сочетания методов и подходов в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

Глазовская М.А. Денудационно-аккумулятивные структуры почвенного покрова как формы проявления педолитогенеза // Почвоведение. 2000. №2 С. 137-148

Глазовская М.А., Фридланд В.М. Принципы составления почвенной карты мира для высших учебных заведений // Почвоведение. 1978. №3. С. 5-5.

Егоров И.Е. Полевые методы изучения почвенной эрозии // Журнал Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2009. №1. С. 157-170

Заславский М.Н. Эрозиоведение. М.: Высш. шк. 1983. 320 с.

Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.

Королева П.В., Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Куляница А.Л., Трубников А.В., Калинина Н.В., Симакова М.С. Местоположение открытой поверхности почвы и линии почвы в спектральном пространстве RED-NIR // Почвоведение. 2017. №12. С. 1435-1446.

Погода в Курске, Курская область: [Электронный ресурс]. URL: <https://rp5.ru/>. (Дата обращения: 01.11.2021).

Фридланд В.М. Структура почвенного покрова. М.: Мысль, 1972. 424с.

Шишкина Д.Ю. Экологическая оценка динамики сельскохозяйственных земель Ростовской области//Известия вузов. 2017. С. 122-128.

Notebaert B., Verstraeten G., Govers G. WaTEM / SEDEM version Manual, 2006. 29 p.

ОПЫТ ОДНОМЕРНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В МИКРО-, МЕЗО- И МАКРОПРИЛИВНЫХ УСТЬЯХ МАЛЫХ РЕК*

(научный руководитель - к.г.н., доц., А.М. Алабян)

В каждом приливном устье реки из-за влияния речных и морских факторов формируется специфический гидродинамический режим, сложный для комплексного изучения. Наиболее эффективным методом его исследования является сочетание полевых работ и гидродинамического моделирования. Детальная модель конкретного устья реки предоставляет целостную в пространстве и времени картину изменения полей течений, уровней воды и других гидродинамических характеристик, позволяет исследовать гидродинамику устьевой области при различных сочетаниях факторов, влияющих на структуру потока. Такой комплексный подход успешно реализуется в настоящее время для приливных дельт Северной Двины [Лебедева, Одоев, 2020] и Печоры [Крыленко и др., 2021].

Разработанные двумерные гидродинамические модели дельт правдоподобно воспроизводят общие черты гидродинамического режима, однако в некоторых случаях количественные несоответствия результатов моделирования фактическим значениям оказываются весьма существенными. Это связано с множеством факторов. Принято считать, что погрешности результатов моделирования в основном определяются неточностями задания рельефа русла и поймы и граничных условий, что, в свою очередь, определяется сложностью проведения в крупном устье реки всего необходимого для настройки модели комплекса измерений. При этом возможностей современного оборудования не всегда бывает достаточно для измерений требуемой точности и детальности. Например, одно измерение расхода воды даже с использованием акустического доплеровского профилографа (ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler) в устьевом створе Мезени шириной 9 км занимает более 1,5 часов [Демиденко и др., 2015]. За это время уровень воды в створе измерения изменяется более чем на два метра, то есть полученное значение расхода воды оказывается серьезно заниженным по сравнению с реальным мгновенным его значением.

Использование в качестве объекта исследования устьевого участка малой реки ввиду его компактности и относительно простой морфологии дает возможность в ходе полевых работ собрать материал высокой точности и, следовательно, оценить реальные возможности гидродинамической модели применительно к устьевым областям в условиях приливных колебаний уровня.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-29-01184) и РФФИ (проект № 19-35-90032).

В случаях, когда основной целью исследования является анализ изменений гидродинамических характеристик потока по длине участка реки, а их вариации в поперечном сечении и по глубине незначительны или не представляют интереса, целесообразно использование одномерных (1D) моделей. Такой подход реализуем при исследовании участков рек, длина которых на несколько порядков превышает ширину и глубину русла. Цель данного исследования – оценить применимость именно одномерной гидродинамической модели для изучения гидродинамического режима в устьях рек с различной величиной прилива и реверсивными движениями воды.

В данном исследовании рассматриваются три малые реки, впадающие в Белое море: Кянда, Лая и Сёмжа (рис. 1).

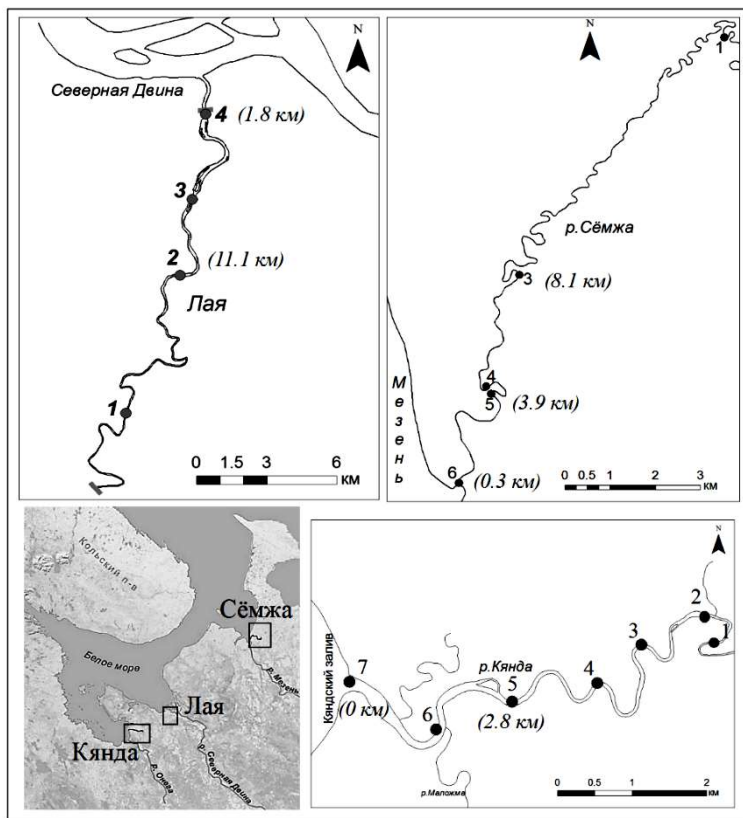


Рис. 1. Схема расположения объектов исследования и схемы устьевых участков р. Лая, р. Сёмжи, р. Кянды с отмеченными калибровочными створами

Река Кянда берет начало из озера Кяндозеро, впадает в Кяндский залив, расположенный в юго-восточной части Онежского залива Белого моря. Длина реки составляет 49 км, площадь бассейна 510 км². Средний

уклон реки равен 1,9‰, однако на нижних девяти километрах реки средний уклон дна уменьшается до 0,2‰. Величина сизигийного прилива в устьевом створе Кянды составляет 2-2,5 м. Дальность проникновения приливных колебаний уровня воды по данным измерений в летнюю межень составляет около десяти километров.

Река Лая является левым притоком Северной Двины, впадая в Никольский рукав ее дельты. Длина реки 131 км, площадь бассейна 2120 км². Средний уклон дна равен 0,37‰. При этом в нижнем течении (около 20 км от устья) он уменьшается примерно вдвое и составляет около 0,2‰. Величина прилива в месте впадения Лаи составляет 0,5-1,0 м. Приливные колебания уровней воды в периоды пониженного меженного стока распространяются на 25-30 км.

Река Сёмжа берет начало из озера Сёмжа, впадает в эстуарий Мезени в шести километрах выше ее устьевого створа. Длина реки составляет 63 км, площадь бассейна – 490 км². Средний уклон реки 0,61‰, при этом средний уклон дна на нижних 22 км русла, где заметно воздействие приливов, составляет 0,26‰. Величина приливов, наблюдающихся в устьевом створе Сёмжи, составляет 6-8 м. Дальность распространения приливных колебаний уровня воды в летнюю межень составляет порядка 22 км.

Обладея схожими физико-географическими условиями формирования стока, величинами меженного стока, реки существенно различаются по гидродинамическому режиму в нижнем течении. Это объясняется как различием в величине прилива, так и разным геоморфологическим строением русел рек на устьевых участках.

В устьевых областях данных рек были выполнены серии полевых работ, в ходе которых были собраны данные о рельефе, уровнях и расходах воды, используемые далее для гидродинамического моделирования. На Сёмже экспедиции проводились в августе 2015 г. и августе 2018 г., на Лая – в мае, июле, сентябре 2019 г. и июле 2020 г., на Кянде – в феврале 2017 г. и 2019 г., в августе 2016 г. и 2017 г.

Рассматриваемые далее результаты моделирования описывают гидродинамику устьевых участков рек в условиях летней межени.

Одномерная модель Лаи охватывает ее устьевой участок от 1,8 км до 28,1 км выше места ее впадения в Никольский рукав дельты Северной Двины. Назначение нижней границы на удалении от устьевого створа почти на два километра было обусловлено тем обстоятельством, что в самом низовье реки расположен Лайский док, в акватории которого выполнение гидрометрических работ было нецелесообразным. Рельеф задан 226 поперечными профилями русла. Данные о рельефе дна участка с 1,8 км до 21,5 км сняты с цифровой модели рельефа, построенной по результатам промерных работ, на верхнем участке (21,5-26,3 км) рельеф задан схематичными профилями, где уклон дна постепенно увеличивается для выклинивания приливного воздействия.

Одномерная модель устьевого участка Кянды охватывает участок русла длиной 9,9 км с нижней границей в устьевом створе и верхней у де-

ревни Кянда. Рельеф русла был задан с помощью 51 поперечных профилей, расстояние между которыми составляет 150-200 м. Поперечные профили для участка 0-6,25 км достаточно подробно описывают рельеф дна реки, полученный в ходе промерных работ. На вышележащем участке измерения глубин проводились только по продольному профилю, и поперечные профили принимались параболической формы с максимальной глубиной, соответствующей глубине фарватера.

Область моделирования устьевого участка Сёмжи охватывает ее низовья до 21,3 км от устьевого створа. Нижняя граница модели была задана в 0,3 км выше устьевого створа в вершине короткого воронкообразного эстуария, где во время полевых работ находился регистратор уровня воды. Рельеф русла задан 98 поперечными профилями. Нижний восьмикилометровый участок описан подробными поперечными профилями, расположенными через каждые 150-250 м, выше по течению реки из-за малых глубин профили схематичные, параболической формы, расположены на расстоянии 350-450 м друг от друга.

В качестве граничных условиях для каждой модели на верхней границе задавался постоянный речной расход воды (измеренный выше зоны влияния приливов), на нижней – измеренный уровень воды, изменяющийся в течение приливного цикла.

Калибровка проводилась по данным измерений уровней и расходов воды в нескольких створах (рис. 1). В калибровочных створах оценивался минимальный уровень воды (до начала прилива), максимальный уровень воды в полную воду, а также время наступления полной воды и начала прилива. При анализе расходов воды внимание уделялось их экстремальным значениям и времени наступления, а также расходу воды до начала прилива.

Для Кянды и Сёмжи при калибровке устьевые участки были разбиты на несколько частей с различными коэффициентами шероховатости, на Лае для всей моделируемой области был задан единый коэффициент шероховатости (табл. 1).

Таблица 1. Подобранные в ходе калибровки коэффициенты шероховатости для моделей устьевых участков рек

Река	Коэффициент шероховатости Маннинга
Сёмжа	$n = 0,015$ (0 – 7 км), $n = 0,03$ (7 – 21 км)
Кянда	$n = 0,01$ (0 – 7,1 км), $n = 0,025$ (7,1 – 9,9 км)
Лая	$n = 0,01$

Стоит отметить, что подобранные для нижних, прилегающих к устьевым створам, участков коэффициенты шероховатости оказались значительно меньше, чем значения, характерные для морфологически сходных участков обычных рек с квазиустановившимся режимом течений. Аналогичный феномен ранее отмечался и при калибровке двумерных моделей приливных дельт [Лебедева и др., 2015; Крыленко и др., 2021].

Уровни воды в калибровочном створе Лай (створ 2 на рис. 1) в результате моделирования завышаются на 7-10 см, но величина прилива воспроизводится достаточно точно (рис. 2). На Кянде смоделированный диапазон изменения уровней воды занижен относительно фактического в среднем для калибровочных створов на 10-15 см, при этом основная ошибка связана с завышением уровней воды в малую воду (то есть до начала приливного роста) (рис. 2).

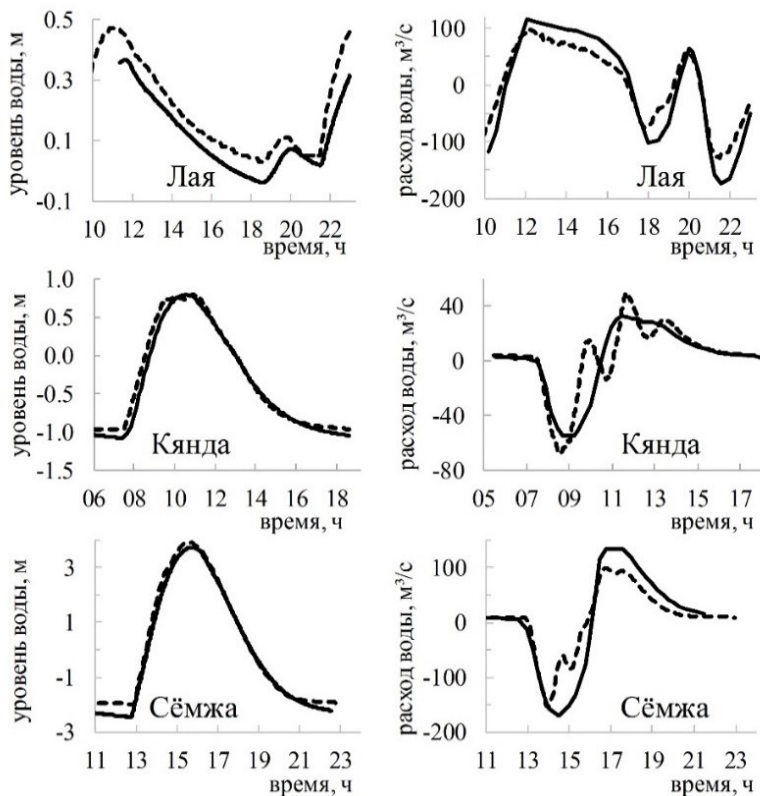


Рис. 2. Измеренные (сплошная линия) и смоделированные (пунктирная линия) уровни и расходы воды в калибровочных створах

На Сёмже из-за более сложного характера распространения приливной волны в калибровочных створах ближе к устью так же, как на Кянде, смоделированные минимальные уровни завышены (на 60-70 см), а на большем удалении от устья основное расхождение наблюдается в максимальных уровнях воды (в модели они занижены на 60 см) (рис. 2). В процентном отношении смоделированная величина прилива на Кянде занижена

относительно измеренной на 5%, на Лае – на 5-7%, на Сёмже – на 6-14% (табл. 2).

Таблица 2. Погрешность смоделированного диапазона изменений уровней и расходов воды за приливный цикл в калибровочных створах относительно данных измерений.

Модель	Погрешность смоделированного диапазона изменений за приливный цикл			
	уровней воды		расходов воды	
Лая	5-7 %	3-5 см	22%	85 м ³ /с
Кянда	5%	10 см	4 - 35%	10 - 30 м ³ /с
Сёмжа	6 – 14 %	40 - 50 см	13 - 18%	40 - 50 м ³ /с

Максимальные за прилив уровни воды на устьевом участке Лаи наблюдаются не одновременно в створах на различном удалении от устья: фактическое различие во времени наступления полной воды на нижней границе и в створе 2 (9,5 км выше) составляет час. В модели приливная волна движется быстрее и максимум уровня воды в створе 2 наступает на 20 минут раньше. В то же время неточность в воспроизведении скорости движения гребня волны несколько компенсируется увеличением времени отлива при моделировании. В результате минимальный уровень воды на расстоянии 9,5 км от устья наступает на 2 часа позже, чем на нижней границе моделируемого участка, как по данным измерений, так и в модели. Таким образом, скорость движения волны по фронту составляет 4,75 км/ч (1,32 м/с) и точно воспроизводится моделью.

На Кянде полная вода наблюдается одновременно на всем устьевом участке (с разницей до 5 минут), что точно воспроизводится моделью. Скорость движения приливной волны по фронту также точно моделируется и варьирует от 0,54 м/с до 2,83 м/с на различных участках русла.

На Сёмже время наступления экстремальных значений уровней воды в калибровочных створах также успешно моделируется, с разницей не более 10 минут. Скорость движения приливной волны по фронту в среднем составляет 4,9 км/ч (1,35 м/с).

Дальность распространения приливных колебаний уровня воды и реверсивных течений на устьевом участке соответствует данным измерений – 9 км и 7,7 км соответственно. На Сёмже по результатам моделирования приливные колебания уровня воды распространяются на 21 км (что соответствует действительности), реверсивные течения – на 17,7 км. Фактически граница распространения обратных течений установлена не была, ориентировочно она проходила на 14-16 км.

Расходы воды для калибровки на всех реках измерялись в нижних частях устьевых участков: так, на Сёмже и Лае створы расположены в ближней к устью 1/5 части, на Кянде – в нижней трети. В результате моделирования диапазон колебания расходов воды в течение приливного цикла занижен на Лае на 22%, на Сёмже на 13-18%, на Кянде – завышен на 4-35%

(рис. 2, табл. 2). На Сёмже и Кянде, как и с уровнями воды, в более удаленных от устья створах результаты моделирования хуже.

На графиках смоделированных изменений расходов воды на Кянде и Сёмже проявляются нефизичные колебания значений, фактически не наблюдающиеся (рис. 2). Однако если провести сглаживание поля точек для расчетных значений, то они будут вполне адекватно отражать ход фактических значений скорости течения и расхода воды. Данные колебания объясняются численной неустойчивостью решения, связанной с маленькими значениями коэффициента шероховатости, которые были подобраны для наилучшего воспроизведения минимальных уровней воды.

Основные выводы:

1. Одномерные гидродинамические модели наилучшим образом воспроизводят скорость продвижения приливной волны.

2. Результаты одномерного моделирования в устьях рек Кянды, Лаи, Сёмжи показали, что, несмотря на подробные исходные данные, диапазон изменения уровней воды в течение приливного цикла воспроизводится с точностью 5-10%, диапазон изменения расходов воды – с точностью порядка 20%. Кроме того, для некоторых моделей характерна неустойчивость расчета из-за маленького коэффициента шероховатости, снижающая качество моделирования.

3. Возможность применения одномерной модели должна определяться для каждого устьевое участка в зависимости от поставленных задач и требуемой точности результатов расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

Демиденко Н. А., Зиновьев А. Т., Алабян А. М., Панченко Е. Д., Фингерт Е. А., Льюменс М. Исследование и моделирование параметров гидрологического режима и динамики взвешенных наносов в Мезенском заливе и эстуариях Мезени и Кулоя // *Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов».* М: ГЕОС, 2015. Т. 3. С. 175-179.

Крыленко И.Н., Алабян А.М., Василенко А.Н., Демиденко Н.А., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А. Двумерная гидродинамическая модель устьевой области реки Печоры // *Труды X Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2021)".* Т. 1. Тверь: ПолиПРЕСС, 2021. С. 317-320.

Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // *Геориск.* 2015. № 1. С. 18-25.

Лебедева С.В., Одоев Л.С. Роль ледовых явлений в динамике потоков на придельтовом участке Северной Двины // *Гидросфера. Опасные процессы и явления.* 2020. Т. 2. № 4. С. 330-346. doi:10.34753/HS.2020.2.4.330.

**РАЗРАБОТКА РЕГИОНАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МУТНОСТИ ВОДЫ ПО ДАННЫМ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**
(научный руководитель – д.г.н., доц., С.Р. Чалов)

Начало применения методов дистанционного зондирования Земли для изучения характеристик стока наносов связано с запуском первого спутника Земли в 70-х годах XX в. Мутность воды демонстрирует устойчивую связь с цветом поверхностной воды, благодаря оптическим свойствам. Отклики на видимую часть электромагнитного спектра в зависимости от концентрации наносов на поверхности воды позволили получить абсолютные значения мутности воды из космоса, поскольку поверхностное отражение в значительной степени связано с рассеянием взвешенных частиц в поверхностном горизонте [Kirk, 1989]. Отражательная способность водного объекта зависит в первую очередь от свойств воды: содержание минеральных, взвешенных и растворенных частицы [Mobley et al., 2004]. Таким образом, мутность воды непосредственно влияет на условия прохождения электромагнитных волн сквозь ее толщу. Наличие частиц в воде повышает показатель преломления, поглощения и отражения света [Muint, Walker, 2002].

Методика оценки мутности воды по данным дистанционного зондирования Земли связана с переходом от яркости пикселя на снимке к фактическим значениям мутности воды по аналитической формуле связи [Wang, Lu, Zhou, 2007]. При этом вид формулы зависимости мутности воды и значений пикселя снимка имеет региональные особенности, связанные с характеристиками речного бассейна, такими как гранулометрический состав взвеси, состав размываемых пород [Тарасов, Тутубалина, 2018]. Вид зависимости также определяется электромагнитным сектором, в котором проводится разработка зависимости. При оценке мутности воды чаще используется красный [Chalov, Prokoreva, 2021] и ближний инфракрасный [Dogliotti et al., 2015] каналы, так как именно в этих диапазонах достигается максимальные значения коэффициента корреляции. Реже применяются зеленый канал [Doxaran et al., 2002] и комбинации каналов [Poteset et al., 2012]. Изменение диапазона мутности сильно влияет на характер получаемой зависимости. При невысоких значениях мутности (при концентрации до 100-150 мг/л) зависимость между отражательной способностью и концентрацией взвешенных наносов (SSC) приобретает линейная [Chalov et al., 2017a]. Связь более высоких концентрации взвеси и коэффициентов отражения (ρ) описывается зависимостью экспоненциального вида [Smith, Pavelsky, 2009] или степенного вида [Chen et al., 2007].

Для разработки зависимости мутности воды от яркости пикселя могут использоваться различные параметры. Например, в качестве зависимой переменной могут выступать «сырые значения яркости» (Digital Numbers –

DN), в которых зачастую записываются спутниковые снимки. Этот параметр применяется только в том случае, если зависимость будет использоваться только для одной съемочной системы, по которой проводилась разработка [Hellweger et al., 2004]. Больше возможностей открывается при переводе «сырых значений яркости» в коэффициенты отражения (значения яркости на верхней границе атмосферы), так как они не зависят от съемочной системы и параметров съемки [Чалов и др., 2012].

Выбор спутниковой системы зависит от размеров исследуемого водного объекта. Так, для изучения обширных территорий, таких как моря и океанов, используют снимки низкого и среднего разрешения, например, SeaWiFS, Terra MODIS [Petus et al., 2010]. Для исследования крупных водоемов и рек лучше всего подходят снимки с высоким разрешением, например, серии снимков Landsat или Terra ASTER [Chalov et al., 2017b, 2021]. Для изучения небольших водных объектов и детальной разборки ключевых районов крупных объектов используют снимки со сверхвысоким разрешением, например IKONOS, QuickBird, GeoEye-1 [Sawaya et al., 2003]. Среди спутниковых систем, используемых в мониторинге взвешенных наносов, чаще других применяются снимки Landsat 5 (TM), 7 (ETM+) и 8 (OLI/TIRS), что связано с доступностью данных, объемом архива снимков и высокими техническими характеристиками.

В настоящей работе разработка дистанционных моделей определения мутности проводилась на основе применения красного диапазона электромагнитного спектра съемочных систем семейства Landsat. Для каждого снимка была проведена коррекция снимков в два этапа. Первый – это радиометрическая калибровка, необходимая для работы с равнозначными значениями яркости на серии разновременных снимков, полученных с разных датчиков (TM, ETM+, OLI/TIRS). Радиометрическая калибровка направлена на устранение искажений, возникающих вследствие технических причин и природных факторов (наклон Солнца к земной поверхности и расстояние от Земли до Солнца, во время получения снимков), и подразумевает собой преобразование «сырых яркостных значений» сначала в физические единицы – значения спектральной энергетической яркости, получаемые спектральным датчиком излучения $L\lambda$ (at-sensor spectral radiance) на спутнике, а далее перевод полученных значений $L\lambda$ в значения яркости на верхней границе атмосферы ρ_{TOA} (Top of Atmosphere Reflectance). Калибровка проводилась на основе метаданных, предоставляемых к каждому снимку по алгоритму, описанному в [Chander et al., 2009].

На втором этапе подводилась атмосферная коррекция, направленная на абсолютное или относительное исключение влияния атмосферной дымки, повышенной концентрации аэрозолей в воздухе и других явлений, влияющих на искажение яркостных значениях пикселей одинаковых объектов [Hadjimitsis et al., 2004]. В качестве метода атмосферной коррекции, обеспечивающего извлечение физических параметров, был выбран метод темных объектов (Dark Object Subtraction, DOS), который часто используется при работе с водными объектами. Суть метода заключается в поиске вод-

ного объекта с минимальными значениями мутности. Эти объекты с минимальной яркостью на серии разновременных снимков будут обладать одинаковой яркостью, а все отклонения – это и есть влияние атмосферы, поэтому использовался один эталонный снимок, где значения яркости оставались неизменными. Остальные снимки приводились к эталонному, путем сравнения значений темных объектов, с последующим вычитанием их из эталонного значения [Chavez, 1996]. В настоящей работе эталонным снимком является спутниковый снимок на средний участок Лены от 9 июня 2016 г. (LC08_L1TP_121017_20160709_20170323_01_T1).

Вывод формулы зависимости между мутностью воды и коэффициентом отражения проводился на основе полевых данных об измеренной мутности воды и осредненных значений коэффициента отражений пикселей снимка в окрестностях точек полевых замеров. Для этого привлекались данные экспедиционных измерений в среднем течении р. Лена в июле-июне 2016 г. (21 измерений) и 2020 г. (26 изм.), в нижнем течении р. Колыма в августе 2019 г. (12 изм.). Были подобраны спутниковые снимки на период, который бы максимально охватывал даты полевых замеров мутности воды.

Путем сопоставления двух параметров (коэффициент отражения и значение мутности) были получены графики зависимости для разных фаз водного режима в среднем течении р. Лена. Уравнение аппроксимирующей прямой отражает изменение параметра мутности воды в зависимости от параметра значений яркости снимка (рис. 1).

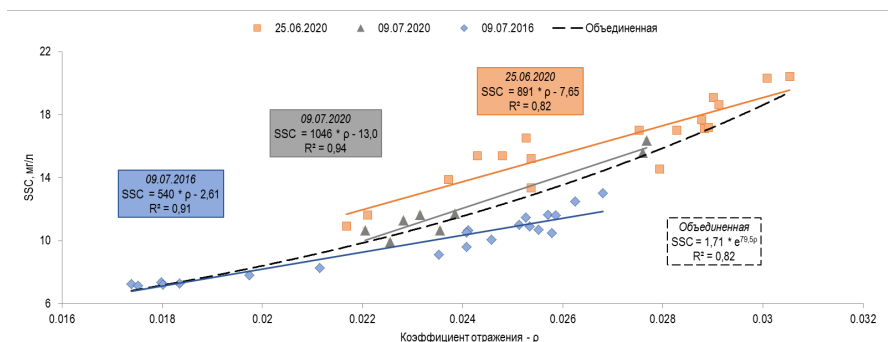


Рис. 1. Совмещенный график зависимостей концентрации взвешенных наносов от коэффициента отражения для среднего течения р. Лена

Совмещение графиков зависимостей концентраций взвешенных наносов от коэффициента отражения для реки Лена в 2016 и 2020 году отражает влияние сезонных факторов на угол наклона аппроксимирующей кривой. С изменением фазы водного режима меняется угол наклона зависимости, что связано с изменениями гранулометрически-минералогического состава взвеси. Так, при увеличении расходов воды в половодье увеличивается не только концентрация взвешенных наносов, также возрастает крупно-

стью переносимой взвеси (средневзвешенная крупность наносов в интегральных пробах по итогам экспедиций 2016 г. составила 96 мкм, а поверхностных проб по итогам экспедиций 2020 г. – 146 мкм), которая влияет на спектральные свойства воды и характеристики отражения, соответственно возрастает коэффициент наклона аппроксимирующей кривой.

Анализ литературы показывает, что на вид зависимости влияние оказывает также диапазон изменения мутности. При малых значениях и малой амплитуде изменения зависимость принимает линейный вид, при увеличении мутности воды вид зависимости меняется на экспоненциальный или степенной, что упрощает перенос зависимости на другие регионы. Таким образом, при объединении (обобщении) зависимостей и увеличении диапазона изменения мутности от 6 до 22 мг/л зависимость принимает степенной вид.

Ограниченность и качество данных отрицательно сказывается на получении региональных зависимостей. Региональная зависимость, полученная для нижнего течения Колымы, описывает лишь небольшой диапазон изменений значений мутности, характерный для ситуаций спада половодья. Однако, зависимости для Лены и Колымы за 2016, 2019 и 2020 годы формируют единое поле точек, которое хорошо экстраполируется зависимостью (рис. 2), основанной на архиве измеренных мутностей воды (51 измерение) и характеризующей ситуации и пониженной, и повышенной водности. Это свидетельствует о том, что сходство состава вод среднего течения Лены и Колымы и, соответственно, характеристик отражения света, представляет возможным использование полученной зависимости для моделирования мутности в пределах нижнего течения Колымы.

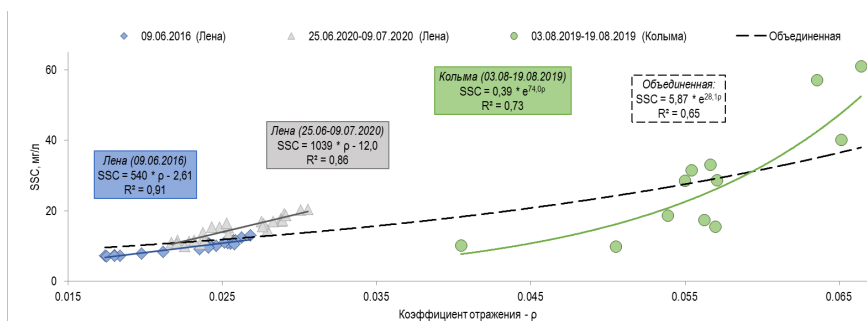


Рис. 2. Совмещенный график зависимостей концентрации взвешенных наносов от коэффициента отражения для рек Лена и Колыма

Таким образом, поглощающие и рассеивающие свойства взвеси влияют на значения коэффициента отражения и определяют общую отражательную способность воды. Основными факторами, влияющими на вид зависимости, являются диапазон изменения значений концентраций взвешенных наносов, распределение взвеси по размеру и цвет наносов. Если по мере увеличения концентрации наносов значение коэффициента отражения уве-

личивается, то по мере увеличения диаметра частиц значение коэффициента отражения, наоборот, уменьшается, что связано с рассеивающими свойствами более мелких частиц [Novo et al. 1989]. Данное предположение было проверено в ходе лабораторных исследований, описанных в работе [Choubeu, 1998]. Таким образом, при равных значениях концентрации взвешенных наносов, объем воды, насыщенный мелкими частицами, рассеивает больше света за счет увеличения удельной поверхности частиц, чем при равном весе крупных частиц в аналогичном объеме воды (рис. 3).

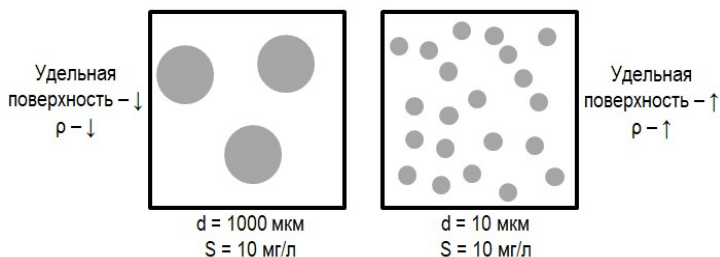


Рис. 3. Схематическое изображение влияние крупности наносов на удельную поверхность и коэффициент отражения

Данные дистанционного зондирования Земли значительно упрощают процесс изучения стока взвешенных наносов как в пространственном, так и во временном масштабе. При наличии полевых данных мутности воды и спутниковых снимков на этот период получения подспутниковых данных возможна калибровка основного параметра стока взвешенных наносов и последующее применение модели в ретроспективных и мониторинговых целях. Однако вид зависимости имеет региональные особенности. В первую очередь принимать модели зависит от диапазона изменения мутности. Важным аспектом при выводе зависимости является распределение взвеси по размерам, что определяет дифференциацию зависимости еще и по фазам водного режима, так как состав и крупность взвеси изменяется прямо пропорционально водности.

Объединение зависимостей и их применение для водных объектов в смежных регионах возможно при сходстве состава взвешенных частиц (гранулометрический состав, распределение по размерам, цвет взвеси и минералогия) и их диапазона изменения.

ЛИТЕРАТУРА

Тарасов М.К., Тутубалина О.В. Методика определения мутности воды в р. Селенге и прилегающей акватории оз. Байкал по данным дистанционного зондирования // Исследования Земли из Космоса. 2018. № 1. С. 278-191.

Чалов С.Р., Белозерова Е.В., Гладкова М.В. Мониторинг мутности поверхностных вод с помощью методов дистанционного зондирования // Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление. 2012. С. 260-273.

Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Modelling suspended sediment distribution in the selenga river delta using LandSat data // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2017a. <https://doi.org/10.5194/piahs-375-19-2017>.

Chalov S., Prokopena K., Habel M. North to South Variations in the Suspended Sediment Transport Budget within Large Siberian River Deltas Revealed by Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. № 22. P. 4549. <https://doi.org/10.3390/rs13224549>.

Chalov S.R., Bazilova V.O., Tarasov M.K. Suspended sediment balance in Selenga delta at the late XX-early XXI century: Simulation by LANDSAT satellite images // Water Resources. 2017b. Vol. 44. № 3. P. 463-470. <https://doi.org/10.1134/S0097807817030071>.

Chalov S.R., Prokopena K.N. Assessment of Suspended Sediment Budget of the Lena River Delta Based on the Remote Sensing Dataset // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2021. Vol. 57. № 9. P. 1051-1060. <https://doi.org/10.1134/S0001433821090450>.

Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. № 5. P. 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>.

Chavez J. Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1996. Vol. 62. № 9. – P. 1025-1036.

Chen Z., Hu C., Muller-Karger F. Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery // Remote Sensing of Environment. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.019>.

Choubey V.K. Laboratory experiment, field and remotely sensed data analysis for the assessment of suspended solids concentration and secchi depth of the reservoir surface water // International Journal of Remote Sensing. 1998. Vol. 19. № 17. P. 3349-3360. <https://doi.org/10.1080/014311698214037>.

Dogliotti A.I., Ruddick K.G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters // Remote Sensing of Environment. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.

Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal wa-

ters // International Journal of Remote Sensing. 2002. Vol. 23. № 23. P. 5079-5085. <https://doi.org/10.1080/0143116021000009912>.

Hadjimitsis D.G., Clayton C.R.I., Hope V.S. An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote sensing of some reservoirs // International Journal of Remote Sensing. 2004. Vol. 25. № 18. P. 3651-3674. <https://doi.org/10.1080/01431160310001647993>.

Hellweger F.L., Schlosser P., Lall U., Weissel J.K. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2004.06.019>.

Kirk J.T.O. The upwelling light stream in natural waters // Limnology and Oceanography. – 1989. <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1410>.

Mobley C.D., Stramski D., Paul Bissett W., Boss E. Optical modeling of ocean waters: Is the case 1 - case 2 classification still useful? // Oceanography. – 2004. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2004.48>.

Myint S.W., Walker N.D. Quantification of surface suspended sediments along a river dominated coast with NOAA AVHRR and Sea WiFS measurements: Louisiana, USA // International Journal of Remote Sensing. 2002. <https://doi.org/10.1080/01431160110104700>.

Novo E.M., Hansom J.D., Curran P.J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration // International Journal of Remote Sensing. 1989. <https://doi.org/10.1080/01431168908903967>.

Petus C., Chust G., Gohin F., Doxaran D., Froidefond J.M., Sagarmiraga Y. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery // Continental Shelf Research. – 2010. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007>.

Potes M., Costa M.J., Salgado R. Satellite remote sensing of water turbidity in Alqueva reservoir and implications on lake modelling // Hydrology and Earth System Sciences. – 2012. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1623-2012>.

Sawaya K.E., Olmanson L.G., Heinert N.J., Brezonik P.L., Bauer M.E. Extending satellite remote sensing to local scales: Land and water resource monitoring using high-resolution imagery // Remote Sensing of Environment. – 2003. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.04.006>.

Smith L.C., Pavelsky T.M. Remote sensing of volumetric storage changes in lakes // Earth Surface Processes and Landforms. 2009. <https://doi.org/10.1002/esp.1822>.

Wang J., Lu X., Zhou Y. Retrieval of suspended sediment concentrations in the turbid water of the Upper Yangtze River using Landsat ETM+ // Chinese Science Bulletin. 2007. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-7012-6>.

**ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ КЛИМАТА НА МНОГОЛЕТНИЕ
ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НЕКОТОРЫХ РЕК БАССЕЙНА ВЕРХНЕГО ДНЕПРА**

(научный руководитель – к.г.н., доц., Г.В. Лобанов)

Оценка влияния изменений климата на отдельные компоненты ландшафта, в частности гидрологических характеристик рек, остается актуальной научной задачей. Прогноз влияния строится на представлении о сложной и разнообразной роли климата как фактора стока. Сложность прогноза, по нашему мнению, определяется двумя существенными обстоятельствами. Во-первых, опосредованным влиянием климата на сток через компоненты ландшафтов. В частности, краткосрочные колебания количества осадков, испаряемости не всегда проявляются в динамике расходов. Большое влияние здесь оказывают особенности водного баланса в предыдущие годы (или сезоны), а именно для рек с большой долей подземных источников питания. При предшествующем дефицитном балансе подземных источников даже обильные осадки несут незначительное влияние на расход воды. Во-вторых, одновременным влиянием на динамику стока изменений хозяйственной деятельности и природных условий, которые могут быть как односторонними, так и разнонаправленными. В первом случае характеристики стока закономерно увеличиваются или уменьшаются; во втором изменяются незначительно, поскольку действие факторов взаимно компенсируется.

Вместе с тем модели влияния климата на сток широко распространены и используются в прогнозах состояния гидрологических объектов (например, расходов средней и малой обеспеченности, скорости и направления русловых деформаций). При этом используются как модели теоретического уровня, построенные на принципиальных отношениях факторов, так и теоретико-эмпирические, региональные, учитывающие неодинаковый вес разных условий стока. Модели последнего типа позволяют составить прогнозы наилучшим образом, соответствующие местным условиям.

В представленных материалах рассмотрены особенности взаимодействия климата и стока на примере динамики средних, максимальных и минимальных расходов в бассейне верхнего Днепра во второй половине XX – начале XXI века. Ключевыми объектами исследования выбраны малые и средние реки. Выбор обоснован представлением о высокой чувствительности состояния рек этого размера к изменению географических условий в связи с тем, что такие изменения (природные или антропогенные) захватывают обычно значительную часть бассейна.

Исходные данные для исследования динамики характеристик стока составили материалы гидропостов на малых реках бассейна верхнего Днепра (Коста – гидропост Глазово, Сев – гидропост Новоямское, Навля – гид-

ропост Навля, Судость – гидропост Погар). Для сравнения выбраны минимальные, средние и максимальные расходы воды за два десятилетия: в середине XX века (50-60-е гг.) и 10-е гг. XXI века. Гидрограф всех объектов исследования аналогичен: выраженный максимум весеннего половодья (апрель), межень в летние месяцы, слабо выраженный осенний паводок и зимняя межень несколько большая, чем летняя.

Материалы для изучения изменения факторов стока составили данные метеонаблюдений (3 метеостанции) и топографические материалы середины XX века и начала XXI века.

Метеорологические наблюдения в бассейне верхнего Днепра ведутся от последних десятилетий XIX века; гидрологические наблюдения на крупных реках – с этого же времени, на средних и малых – от середины XX века. Сведения о состоянии местности и её многолетней динамике представлены на разновременных картографических материалах (карты военно-топографического управления, карты РККА, карты Генштаба, современные спутниковые снимки).

Район исследований разнообразен по условиям стока и пересечён несколькими природными рубежами. Северная часть верхнего Поднепровья – среднерасчленённые возвышенные моренные равнины, восточная часть – западные отроги Среднерусской возвышенности; остальная часть – низменные моренные и флювиогляциальные равнины. Естественная растительность представлена смешанными лесами на водоразделах (елово-мелколиственными с примесью широколиственных пород) и сосняками на террасах. Значительная часть территории распахана, лесистость бассейнов составляет от менее 5% до 75%, в частности в районе исследования от менее 5 до 13%. Остальную площадь водосборов объектов исследования занимают сельхозугодья.

От середины XX века средний расход объектов исследования неодинаково сократился: от 5% на р. Навля, до 33% на р. Судость (табл. 1).

Таблица 1. Средние гидрологические характеристики объектов исследования в середине XX – начале XXI века (период осреднения 10 лет): I – середина XX века, II – начало XXI века

Реки	Расходы, м ³ /сек							
	Минимальные (летняя межень)		Минимальные (зимняя межень)		Максимальные (половодье)		Средние за десятилетие	
	I	II	I	II	I	II	I	II
Коста	0,003	0,06	0,005	0,15	61,1	28,7	0,72	0,65
Сев	0,19	0,12	0,20	0,53	193	69,4	3,49	3,04
Навля	0,63	0,64	0,89	2,34	233	87,1	6,82	6,49
Судость	1,46	2,6	1,73	4,63	915	212	18,5	14,1

Минимальные расходы сократились за этот период значительно больше – в среднем по объектам исследования в 3 раза (от 2 раз на р. Коста до 4 раз на р. Судость). Изменение максимальных расходов более сложное. Расходы зимней межени увеличились в среднем в 9,5 раз, причём на срав-

нительно крупных водотоках – в 2,5-2,7 раза, на р. Коста с самым малым водосбором – в 30 раз. Расходы летней межени изменились неодинаково: увеличились у р. Судость и Коста, практически не изменились у р. Навля, уменьшились у р. Сев [Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов; Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России].

В этот же период климатические факторы стока изменились следующим образом. Средняя температура и осадки за десятилетие заметно увеличились: на 2,2°C от 5,2°C до 7,4°C и с 542 мм до 605 мм соответственно. Прохладный сухой период середины XX века сменился тёплым и влажным. Важная для стока особенность начала XXI века – мягкие зимы с небольшим количеством снега в конце климатического сезона. Следует принять во внимание, что потепление происходило поступательно, а количество осадков изменялось сложнее. Между периодами сравнения было 2 выраженных многолетних максимума осадков – в 70-е гг. XX века и конце 90-х – начале XXI века. Соответственно второе десятилетие нашего века приходится на спад максимума осадков [Каганер, 1971; Погода и климат].

Динамика гидрологических характеристики частично согласуется с изменениями климата. Сокращение средних расходов объясняется увеличением испарения (вследствие роста температур); выраженное сокращение максимальных – небольшими запасами воды в снеге (перед снеготаянием). Вместе с тем рост количества осадков предположительно должен способствовать увеличению расходов, а неодинаковое направление изменения расходов летней межени указывает на значимую роль других факторов стока [Опшюков, 1904].

Перечисленные особенности динамики объясняются, вероятно, неодинаковыми изменениями факторов стока, в частности ландшафтной структуры водосборов. В период сравнения соотношение основных категорий земель на водосборах изменилось незначительно. На несколько процентов выросла лесистость и, соответственно, сократилась площадь сельхозугодий (табл. 2).

Таблица 2. Лесистость водосборов объектов исследования

Бассейн	Лесистость, середина XX века	Лесистость, начало XXI века
Коста	2,7	4,7
Сев	8,5	10,6
Навля	11,3	13,4
Судость	10,7	12,8

По теоретическим представлениям рост лесистости способствует увеличению стока, однако доля лесов в ландшафтной структуре за 70 лет принципиально не изменилась. В бассейнах рек, летний расход которых увеличился за период сравнения, выросло количество прудов, которые аккумулируют часть весеннего стока и являются в период дефицита осадков важными источниками питания малых рек.

Влияние изменений климата на динамику стока на уровне отдельных бассейнов (на примере бассейна верхнего Днепра) в целом согласуется с теоретическими представлениями, но диапазоны, и в ряде случаев направления изменений, сильно зависят от местных особенностей. Климат в первом приближении можно считать главным регулятором гидрологического режима малых и средних рек при стабильности антропогенных факторов. Вместе с тем рациональное устройство водного хозяйства может смягчать негативные последствия маловодья, вызванные современным потеплением.

ЛИТЕРАТУРА

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов [Электронный ресурс] // Федеральное агентство водных ресурсов. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=1>

Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России [Электронный ресурс] // Центр регистра и кадастра. URL: <http://gis.vodinfo.ru/hydrographs/basin/4>

Методы изучения и расчета водного баланса / под ред. А.А. Соколова. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 393 с.

Оппоков Е.В. Режим речного стока в бассейне верхнего Днепра (до гор. Киева) и его составных частях в период 1876–1901 г., а частью и в более отдаленное время, в связи с колебаниями атмосферных осадков и температуры в бассейне и с местными условиями стока [Электронный ресурс]. Санкт-Петербург, 1904. 300 с. URL: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/216947>

Погода и климат [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru®ion=32>

Природа Орловского края [Электронный ресурс] / В.Н. Хитрово и др. Орел: Труд, 1925. 576 с. URL: <https://elib.rgo.ru/handle/123456789/228300>

Ресурсы поверхностных вод СССР. Украина и Молдавия. Т. 6. / под ред. М. С. Каганера. Ленинград: Гидрометеиздат. 1971. 655 с.

В.Ю. Украинцев, аспирант
Институт географии РАН
Институт водных проблем РАН

СТРОЕНИЕ РЕЧНЫХ ДОЛИН НИЖНЕГО ЗАВОЛЖЬЯ* (научный руководитель – проф., д.г.н. А.В. Панин)

Нижнее Заволжье — обширная территория на юге Восточно-Европейской равнины (ВЕР) севернее Прикаспийской низменности. Сейчас это зона сухих степей, характеризующаяся малым количеством осадков и скудным речным стоком. По некоторым данным, количество осадков было

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект 19-17-00215 П)

здесь небольшим и в раннем голоцене, и в позднеледниковье [Bezrodnykh et al, 2020; Mogofova et al, 2021]. Вместе с тем, в связи с климатическими изменениями, которые происходили в это время, речной сток здесь должен был быть гораздо выше [Borisova, 2021]. Причём, если экстраполировать выводы, сделанные для центральной части ВЕР, на эту территорию, то он был сильнее поляризован в течение года по сравнению с современной эпохой, в сторону увеличенного поверхностного стока в половодье [Vandenberghe, Sidorchuk, 2020]. Верхнечетвертичные отложения Нижнего Заволжья состоят в основном из пылеватого и суглинистого материала [Жуков, 1945], а речные долины, несмотря на плоский рельеф и малые уклоны поверхности, достаточно глубоко врезаются, что хорошо видно на цифровых моделях рельефа (ЦМР). Упомянутые сведения говорят о необычной истории развития рек этой территории в позднем неоплейстоцене–голоцене, тесно связанной как с историей развития Каспийского моря, так и с климатическими изменениями на Восточно-Европейской равнине.

В Нижнем Заволжье распространены крупные палеоруслу, размер которых не соответствует величинам стока рек, в долинах которых они находятся. Такие палеоруслу, формировавшиеся вследствие кратного возрастания стока рек, распространены по всей ВЕР [Vandenberghe, Sidorchuk, 2020]. Возраст их формирования в Нижнем Заволжье неизвестен и можно лишь экстраполировать на эти палеоруслу возраст аналогичных объектов в центральной части равнины, где они формировались 18-13 тыс. лет назад во время эпохи мощного стока [Panin, Matlakhova, 2015]. Ранее на основании гидролого-морфологического анализа были сделаны выводы, что в прошлом речной сток в бассейне Волги превышал современный в 1,5-2 раза, причём в южной части бассейна превышение палеостока над современным было большим [Sidorchuk et al, 2021].

Объектами нашего исследования в Нижнем Заволжье стали реки Большой Иргиз, Камелик, Большой и Малый Узени, Кушум, Еруслан, а также ряд небольших рек, несущих свои воды в бессточную область Северного Прикаспия. Большинство этих рек берут начало на возвышенности Общий Сырт и имеют конечный бассейн стока в виде Каспийского моря. Узени, Кушум и малые реки являются бессточными — теряют свои воды и заканчиваются на юге территории, однако на спутниковых снимках и топокартах хорошо видны следы былого течения последних дальше на юг (рис. 1). Их дальнейшее течение подтверждается и архивными данными. Например, Н.С. Сажин [1928] пишет, что ещё в начале XX века прикаспийские реки в наиболее полноводные годы, разливаясь и объединяясь в единые потоки, дотекали до Камыш-Сакмарских озёр. В менее полноводные годы эти реки выходили из своих узких долин и разносили свои воды по так называемым разливам – Чижинским, Дюринским, Узенским и Урало-Кушумским, где воды исчезали в течение тёплого сезона. Сейчас до этой области дотекают лишь Узени, однако и это происходит лишь благодаря строительству Саратовской оросительно-обводнительной системы и поступлению воды из Волги в Еруслан и Узени. Естественный сток рек нижнего Заволжья

настолько низок, что течение наблюдается только в половодье [Сажин, 1928].

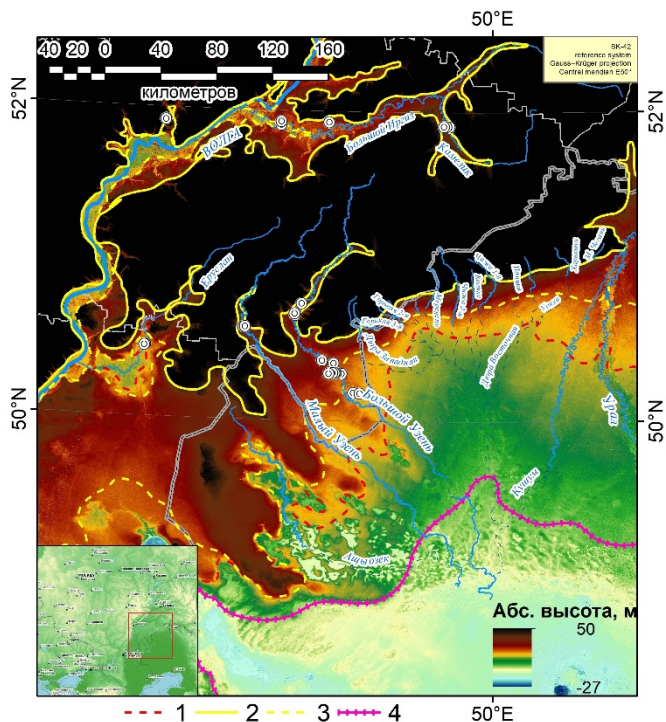


Рис. 1. Рельеф и основные реки Нижнего Заволжья. Точками обозначены пробуренные скважины, синяя сплошная линия – реки, штрих – сухие русла. Горизонтали: 1: +15 м абс. (ранняя хвалынская трансгрессия), 2: +45 м (средняя максимальная), 3: +22 м (средняя, после прорыва Манычского перешейка); 4: 0 м (поздняя).

Климатические характеристики Нижнего Заволжья в позднем плейстоцене–голоцене, если проводить параллели с современностью, можно экстраполировать со всей ВЕР в этот же период, но со смещением в сторону большей сухости. В максимум последнего оледенения (LGM) на ВЕР реконструируются самые низкие летние температуры; в начале позднеледниковья происходит потепление и увеличение количества осадков; ещё сильнее это проявляется в бёллинг-аллерёде. В позднем дриасе происходит серьёзное похолодание, сменяющееся в голоцене потеплением с климатическими характеристиками, аналогичными современным [Botisova, 2021]. Сам Каспий в позднем плейстоцене испытывал раннехвалынскую трансгрессию [Федоров, 1957], пик которой, согласно последним обобщениям [Янина, 2019; Bezrodnykh, 2020], пришёлся на начало позднеледниковья. В это время уровень моря достигал отметки +45 м абсолютной высоты, то есть достигал

долин Большого Иргиза, Камелика, Узеней; на месте прикаспийских рек было море [Svitch, Makshaev, 2020]. Позднехвалынская трансгрессия происходила в конце позднеледниковья – первой половине борсала (ранний голоцен). Во время её пика уровень моря достигал 0 м над уровнем моря [Янина и др., 2019; Жуков 1945]. Л.Б. Аристархова и Г.Т.-Г. Турикешев [1983] на основании геоморфологического анализа реконструируют стадии изменения уровня моря, выделяя в раннехвалынской трансгрессии узенскую, буйнакскую и туркменскую стадии, в позднехвалынской — максимальную и вторичную, в мангышлакской регрессии – кумскую, сартасскую и дагестанскую фазы, не подкрепляя своё исследование другими видами анализов.

Методика исследования речных долин Нижнего Заволжья включала в себя бурение и отбор образцов, обзор космоснимков, составление продольных и поперечных профилей. В 2021 году автор принимал участие в бурении следов крупных палеорусел рек Большой Иргиз, Большой и Малый Узени, Камелик, Еруслан. Было пробурено 26 скважин (в том числе по профилям) и изучено два обнажения, получено множество образцов на датирование и другие виды анализов. На данный момент получены результаты малакофаунистического анализа, который был проведён в лаборатории новейших отложений и палеогеографии плейстоцена МГУ (проф. Т.А. Яниной). С помощью космических снимков ESRI была проведена трассировка палеорусел в Северном Прикаспии; в среде Arcmap 10.3 сделан картографический материал и получены продольные профили. В программе CorelDraw X7 построены поперечные профили.

Пробуренные в различных частях Нижнего Заволжья толщи представлены в основном алевритами, алевритистыми суглинками, алевритами, либо их переслаиваниями. Пески редки, чаще всего встречаются в долине Большого Иргиза. Шоколадные глины обнаружены в скважинах на юге территории на глубине более 13 м. Отобранные раковины являются как четвертичными пресноводными (озерные и речные виды), так и морскими. По облику закартированных палеорусел видно, что это разветвлявшиеся русла, причём видны следы и объединения в одно, и разделения на несколько, что характерно для потоков с низкими расходами воды, обычно в их устьевой зоне. Большинство из них сейчас заканчиваются слепым устьем или водоёмом, нередко с небольшой дельтой или серией их. Современный аллювий у рек в большинстве случаев отсутствует, дно водотоков сложено слабразложенными современными биогенными отложениями.

Полученные результаты являются пилотными, однако из них можно делать некоторые выводы и предположения. Из результатов малакофаунистического анализа ясно, что покровная толща в среднем течении Большого Узеня состоит из хвалынских морских отложений (алевериты, суглинки), в которые врезано русло реки. Позднеплейстоцен-голоценовый аллювий рек состоит почти исключительно из пылеватых и суглинистых отложений, лишь иногда он представлен песками (рис. 2).

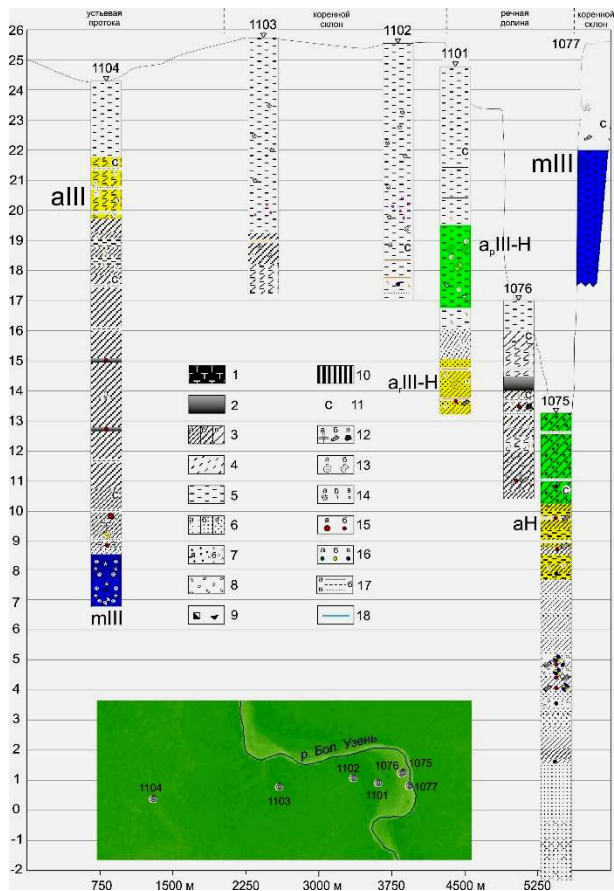


Рис. 2. Поперечный профиль по правому борту долины р. Большой Узень (среднее течение).

1 – торф, оторфованность; 2 – почва, органико-минеральный грунт; 3 – суглинок (тем больше расстояние между линиями, тем легче); 4 – суглинистость; 5 – алевроит, алевроитистость; 6 – песок (чем крупнее точки, тем крупнее песок), опесчаненность; 7 – гравий (а – обломки соотв. цвета, б – глинистый); 8 – галька; 9 – крупная галька, булыжник; 10 – коренные породы/морские Q отложения; 11 – дополнительное обозначение для слоистости; 12 – органика (а – раст., б – дрв./, в – уголь), 13 – ракушка (а – цельная, б – обломки; результаты малакофаун. анализа: зелёный цвет – застойные условия; жёлтый – проточные; синий – морские); 14 – включения (а – новообразования известняка и гипса, б – примазки соответствующего цвета, в – слюда); 15 – образцы на радиоуглеродное датирование (а – общее сцинтилляционное, б – AMS); 16 – образцы на анализы (а – био/споров-пыльцевой, б – петрографический, в – диатомовый); 17 – прослой (а – суглинка, б – алевроита, в – песка); 18 – водоносный горизонт. Заполняющий цвет: четвертичные отложения (синий (mIII) – морские; зелёный (aIII-H) – аллювиальные (фашия заиления); жёлтый (aIII-H) – аллювиальные русловые; без цвета – нет интерпретации

Глубокий врез характерен для отрезков долин, пересекающих крутой южный борт Общего Сырта и выходящих на Прикаспийскую низменность (что хорошо заметно на сделанных продольных профилях рек по разбросу абсолютных высот днищ долин и их бортов). В этой зоне также заметны огромные дельты, которые прорезаются Узеньями, Уралом и Кушумом, а также крупные палеорусла. По всей видимости, изученные палеорусла являются устьевыми протоками, формировавшимися в устьевой зоне. К устью долины становятся всё менее и менее врезанными (так же, как и в сторону верховий), то есть, врезаны в основном те части долин, которые прорезают древние дельты и расположены близко к побережью Каспия второй половины среднехвалынского времени (уровень +22 м абс., [Сидорчук и др., 2018]). Под руслами бурение вскрыло переуглубления — заполненные илистым аллювием погребенные врезы, что отражает глубокое врезание (глубже современного), которое сменилось аккумуляцией.

Складывается впечатление, что падение уровня Каспия было достаточно быстрым и существенным, что спровоцировало глубокое и резкое (судя по крутизне склонов современных русел) врезание впадающих водотоков. Похожие выводы следуют и из других публикаций [Янина и др., 2019; Сидорчук и др., 2018; и др.]. Такую динамику можно связать с прорывом Манычского пролива в среднехвалынское время. Формирование крупных устьевых проток и дельт могло произойти в позднеледниковье вследствие высоких расходов воды (то есть во время, когда на остальной части бассейна Волги формировались крупные палеорусла, поскольку эпоха мощного стока по датам сопоставляется с максимальной хвалынской трансгрессией [Sidorchuk et al, 2021]), когда уровень моря ещё не достигал водораздела в Манычском проливе. Когда уровень достиг +45 м, произошёл прорыв: воды начали переливаться в черноморский бассейн, уровень каспийского бассейна упал и произошло врезание рек. Высокие расходы рек и падение уровня моря обеспечили врезание и сток по одному руслу (а не по разветвлениям). В раннем голоцене, когда эпоха мощного стока закончилась, сформированные врезы частично заполнились рыхлыми осадками. Изменения уровня моря в это время, скорее всего, влияли на развитие речных долин слабо: море уже было далеко, уклоны шельфа очень маленькие и даже меньше, чем в прибрежной части низменности.

Поэтому падение уровня моря не могло вызывать глубокого врезания, а подъём — подпора и аккумуляции (согласно Н.И. Маккавееву, [1955]). Вследствии этого новые дельты не формировались, лишь слепые устья, которые хорошо заметны у малых рек, о чём пишут также М.М. Жуков [1955] и Е.Н. Бадюкова [2020]. У Большого Узеня такое устье есть в нижней части течения, где река и долина полностью исчезают — примерно в этом месте должна была проходить граница позднеледниковского бассейна. Дальше по течению видно русло с признаками эрозии — возможно, здесь сейчас весь поверхностный сток уходит в подземный, который обеспечивает приток воды в низовье на определённой высоте, где вскрывается подземный горизонт. В течение остальной части голоцена реки были совсем маловодными и свои долины не зарабатывали.

Для долин, впадающих в Волгу, наблюдается интересная закономерность: с запада на восток падает доля песка в аллювии рек. Аллювий Еруслана состоит практически только из однообразных песков, расчленение которых требует дополнительных анализов. У Большого Иргиза русловой и базальный аллювий содержат гораздо меньше песка и иногда из него состоят, причём песок более мелкий. Сложной и недостаточно понятной остаётся история развития притока большого Иргиза – Камелика, аллювий которого слагают немые алевритистые толщи. Можно сделать предположение, что аллювий в этих реках формировался из местных источников сноса, которые, в свою очередь, формировались под действием эолового переноса, активность которого (точнее, возможность переносить крупные частицы) снижалась с запада на восток, а первичным источником сноса являлись палеоценовые морские отложения Высокого Приволжья. В пользу этого говорит также присутствие эоловых форм рельефа в долине Еруслана (самой западной) и их отсутствие на востоке территории.

Таким образом, строение речных долин Нижнего Заволжья отражает их историю развития следующим образом: после LGM реки отличались высоким стоком, однако и уровень моря был выше. При впадении в море реки образовывали дельты. Затем уровень моря резко упал, возможно, за счет прорыва каспийских вод через Маныч. В условиях высокого стока это вызвало врезание рек. Затем сток упал, и врезы частично заилились. Изменения уровня моря в голоцене на динамику рек влияния уже не оказывали.

ЛИТЕРАТУРА

Аристархова Л.Б., Турикешев Г.Т.-Г. Реконструкция позднплейстоценовой речной сети Прикаспийской низменности // Геоморфология. – 1983. № 4. С. 62-67

Бадюкова Е.Н. Происхождение “врезанных” или слепых дельт на Волго-Уральском междуречье в свете новых представлений об истории колебаний уровня Каспия // Геоморфология. 2020. №. 3. с. 72-83.

Жуков М.М. Плиоценовая и четвертичная история Севера Прикаспийской впадины. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945 - 235 с.

Маккаев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 353 с.

Сажин Н.С. Сельскохозяйственные мелиорации в Уральской губернии (на территории бывш. Уральского казачьего войска). Вып. 10. Саратов, 1928. 108 с.

Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К. Речной сток на Восточно-Европейской равнине за последние 20 тысяч лет и проблема изменения уровней южных морей // Вопросы географии. 2018. №. 145. С. 144-168.

Федоров П.В. Стратиграфия четвертичных отложений и история развития Каспийского моря // Тр. ГИН АН СССР. 1957. Т. 10. 308 с.

Янина Т.А., Сорокин В.М., Хошраван Г. Эволюция природной среды Каспия в условиях глобальных изменений климата // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. №. 5. С. 160-176.

Bezrodnykh Y. et al. The Northern Caspian Sea: Consequences of climate change for level fluctuations during the Holocene // *Quaternary International*. 2020. Т. 540. С. 68-77. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.01.041.

Borisova O. K. Landscape and Climatic Conditions in the Central East European Plain in the last 22 Thousand Years: Reconstruction based on Palaeobotanical Data // *Water Resources*. 2021. Т. 48. №. 6. С. 886-896. DOI: 10.1134/S0097807821060038.

Morozova P.A. et al. Water Budget of the Caspian Sea in the Last Glacial Maximum by Data of Experiments with Mathematical Models // *Water Resources*. 2021. Т. 48. №. 6. С. 823-830. DOI: 10.1134/S0097807821060130.

Panin A.V., Matlakhova E. Fluvial chronology in the East European Plain over the last 20 ka and its palaeohydrological implications // *Catena*. 2015. Vol. 130. P. 46–61. DOI: 10.1016/j.catena.2014.08.016.

Sidorchuk A.Y., Ukraintsev V. Y., Panin A. V. Estimating Annual Volga Runoff in the Late Glacial Epoch from the Size of River Paleochannels // *Water Resources*. 2021. Т. 48. №. 6. С. 864-876. DOI: 10.1134/S0097807821060178

Svitoch A.A., Makshaev R. R. Incompleteness of the geological record in Middle-Upper Pleistocene key sections of the Northern Caspian Lowland // *Quaternary International*. 2020. Т. 540. С. 78-96. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.04.030.

Vandenberghе J., Sidorchuk A. Large palaeomeanders in Europe: Distribution, formation process, age, environments and significance // *Palaeohydrology*. Springer, Cham, 2020. С. 169-186. DOI: 10.1007/978-3-030-23315-0_9.

Д.В. Фомичева¹, аспирант, м.н.с.

Е.Н. Шамшурина², к.б.н., н.с.

¹*Почвенный институт им. В.В. Докучаева*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,*

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ОТ ЭПОХИ ГЕНЕРАЛЬНОГО МЕЖЕВАНИЯ ДО НАШИХ ДНЕЙ (НА ПРИМЕРЕ КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКОВ В МОСКОВСКОЙ И ТУЛЬСКОЙ ОБЛАСТЯХ)*

(научные руководители – к.г.н., в.н.с. А.П. Жидкин, к.г.н. с.н.с. Н.Н. Иванова)

Процессы водной эрозии почв являются основными агентами перемещения почвенного материала в агроландшафтах равнинных территорий. В настоящее время большинство работ посвящено количественным оценкам современных эрозионных процессов, но почти не изученной остается крайне важная проблема анализа трендов водной эрозии почв во времени.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-27-00170 – анализ истории освоения, реконструкция границ пашни, атрибутирование угодий на планах ГМ), по планам НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Макавеева МГУ им. М.В. Ломоносова (№ 121051100166-4 – подбор и анализ картографических материалов для Тульского участка) и планам НИР (ГЗ) лаборатории эрозии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева (№ 0439-2022-0015 – картографические работы).

Динамика эрозионных процессов определяется многими факторами: составом высеваемых культур, интенсивностью и годовым распределением осадков, эродируемостью почв, рельефом территории. Наибольшее влияние на скорость потерь почвы оказывают эрозионный индекс осадков и топография поверхности пашни [Golosov et al., 2021].

Анализ динамики интенсивности эрозионных процессов проводился на двух ключевых участках, расположенных в южно-таежной и лесостепной зонах Европейской территории России. Природные условия, длительность и характер сельскохозяйственного использования исследованных объектов различны, однако в пределах своих зон они занимают наиболее подверженные проявлениям эрозионных процессов территории (Смоленско-Московская и Среднерусская возвышенности). Участок "Ельдигино" (Пушкинский район Московской области) расположен на южном макросклоне Клинско-Дмитровской гряды, отроге Смоленско-Московской возвышенности. Распашка началась здесь не позднее первой четверти 16 в. и носила фрагментарно-очаговый характер. Участок «Локна» располагается на севере Среднерусской возвышенности в Плавском районе Тульской области. Длительность распашки этой территории более 300 лет, освоение земель носило сплошной характер.

Цель данной работы заключалась в ретроспективной количественной оценке изменений эрозионных процессов при изменениях площади и конфигурации пашни и состава севооборотов на примере выбранных ключевых участков.

Моделирование ливневой эрозии почв осуществлялось при помощи модели WATEM/SEDEM. Алгоритмы расчёта данной модели основаны на эмпирическом уравнении RUSLE. Модель имеет следующие входные параметры: рельеф, эродируемость почв, эрозионный потенциал дождевых осадков, почвозащитная роль растительности.

Реконструкция границ пашни проводилась по специально подобранным картам, созданным в разные периоды времени. Начальным временным рубежом была выбрана эпоха Генерального межевания (конец XVIII в.), поскольку планы Генерального межевания являются первыми картографическими источниками, на которых отражены границы угодий. Границы пахотных земель по картам оцифровывались вручную. На основании полученной динамики площади пашни, а также литературных и архивных данных об изменении состава полевых культур для каждого участка были выделены периоды землепользования, в течение которых величина распаханности и севообороты считались неизменными. Периоды землепользования для двух участков несколько отличаются ввиду различий в характере освоения, наборе полевых культур и обеспеченности территорий картографическим материалом.

На участке «Ельдигино» существенные изменения площадей распахаемых земель за последние 250 лет имеют направленный тренд к снижению: в период Генерального межевания распахивалось 42% от площади участка, а в настоящее время только 8%. Объемы смыва также сократились

в пять раз. Изменения темпов эрозионных процессов не имеют столь явно выраженной тенденции. Максимальные темпы (8 т/га в год) на участке «Ельдигино» отмечались в 30-х гг. XX в. Одной из возможных причин увеличения темпов смыва в тот период является уменьшение противоэрозионной устойчивости севооборотов из-за увеличения доли пропашных культур в их составе. Возможно, что сыграло свою роль и некоторое изменение распределения распаханности в этот период склонов по крутизне. Произошло увеличение доли более крутых склонов (8-10°), в то время как в предыдущий период участки с такими уклонами не распахивались вообще. Впоследствии направленное снижение площади пашни и увеличение противоэрозионной устойчивости сельскохозяйственных культур на ключевом участке способствовало снижению темпов и объемов смыва [Zhidkin et al., 2022].

Изменения площади пашни на участке «Локна» имеют менее выраженный характер - максимальная амплитуда колебаний от периода к периоду не превышала 12%. К началу Генерального межевания было распаханно 79% территории участка. Максимальные значения площади пашни (81%) были отмечены после реформы 1861 г. Рост происходил преимущественно за счет распашки крутых склонов овражно-балочной сети. В течение XX в. происходило постепенное сокращение площадей пашни, минимальные значения (48%) для участка «Локна» были зафиксированы на рубеже XX и XXI веков. В последние годы площадь пашни снова стала увеличиваться и на сегодняшний день распаханность территории составляет 54%. Наши расчеты показали увеличение средних темпов эрозионных процессов и объемов смыва по сравнению с периодом генерального межевания. Освоение наиболее эрозионноопасных участков привело к возрастанию объёмов эрозионных потерь на 10%, а средних темпов смыва – на 6%, хотя площадь пашни увеличилась только на 2%. Остальные факторы эрозии действовали зачастую разнонаправленно. В первые послевоенные десятилетия за счет почти полного отказа от черных паров, роста площадей под многолетними травами и небольшого количества пропашных культур в севооборотах, а также снижения величины эрозионного потенциала осадков произошло уменьшение темпов и объемов смыва по сравнению с началом XX в. почти на 25%. С середины 60-х гг. XX в. отмечаются самые высокие для исследованного периода значения эрозионного потенциала осадков, что привело к увеличению темпов и объемов смыва на 18-20% по сравнению с предыдущим периодом, несмотря на отсутствие изменений площадей пашни и противоэрозионной устойчивости посевов. В последующие годы происходило постоянное увеличение доли пропашных, в период с середины 1980-х до середины 1990-х гг. они занимали до 39% посевных площадей. Распаханность ключевого участка к этому времени сократилась до 60%. Несмотря на низкую почвозащитную способность севооборотов, уменьшились не только общие потери почвы, что можно было бы объяснить изменением площади пашни, но и темпы смыва. Возможной причиной такой динамики эрозионных процессов мог быть отказ от использования склонов долинно-балочной

сети: по предварительным данным, перемещение нижних границ пашни выше бровок балочных форм произошло между 1981 и 1985 гг. На рубеже XX и XXI вв. после развала СССР началось резкое сокращение площадей пашни. Одновременно происходило изменение структуры посевов: доля пропашных сократилась до 9%, а площади под многолетними травами увеличились до 18%. В совокупности со снижением эрозионного потенциала осадков это способствовало снижению объемов и темпов эрозионных потерь до минимальных значений за последние 250 лет. В настоящее время, в отличие от участка в Московской области, изменения площади пашни и интенсивности эрозионных процессов на участке в Тульской области имеют тренд к увеличению.

В целом можно отметить, что участок, расположенный на Клинско-Дмитровской гряде, характеризуется устойчивым выраженным трендом к снижению объемов смыва и более плавным трендом снижения темпов эрозионных процессов, что вызвано уменьшением площади пашни и увеличением противозэрозионной устойчивости севооборотов. Для участка на севере Среднерусской возвышенности характерны более плавные, волнообразные колебания площади пашни и противозэрозионной устойчивости сельскохозяйственных культур, что также отражается на характере эрозионно-аккумулятивных процессов.

Результаты, полученные по Тульскому участку, нуждаются в проверке и уточнении из-за отсутствия части необходимой для корректного моделирования информации, что планируется сделать в дальнейших работах. Так, в рядах данных метеорологической станции в г. Плавск, расположенной практически на границе участка исследования, имеются значительные пробелы. Станция в г. Павелец, ряд данных которой использовался для моделирования, находится на расстоянии 130 км от ключевого объекта. Уточнения необходимы и для границ пашни. В результате полевых исследований на участке «Локна» были обнаружены разновозрастные напашки – антропогенные валы, образующиеся на границах пашни. По предварительным данным изменение границ пашни произошло на рубеже восьмидесятых годов прошлого столетия. Подобные изменения практически невозможно отследить по топографическим картам.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лаборатории почвенной информатики Почвенного института им. В.В. Докучаева за предоставление картографических материалов для территории Тульского участка исследования.

ЛИТЕРАТУРА

Golosov, V. N., Collins, A. L., Dobrovolskaya, N. G., Bazhenova, O. I., Ryzhov, Yu. V., & Sidorchuk, A. Yu. 2021. Soil loss on the arable lands of the forest-steppe and steppe zones of European Russia and Siberia during the period of intensive agriculture. *Geoderma*, 381, 114678. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114678>

Zhidkin A., Fomicheva D., Ivanova N., Dostál T., Yurova A., Komissarov M., Krása J. A detailed reconstruction of changes in the factors and parameters of soil erosion over the past 250 years in the forest zone of European Russia (Moscow region) // International Soil and Water Conservation Research, 2021, preprint <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.06.003>

А.Ю. Харитонов, аспирант
Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова

ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЧНЫХ ДОЛИН ЧУВАШСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

(научный руководитель – к.г.н., доц. И.В. Никонорова)

Исследования гидрологических процессов в последние годы набирает все большие обороты, и одним из основных методов изучения данных процессов является теория фракталов. Долины рек имеют свойство самоподобия, т. е. ее форма повторяется при увеличении масштаба. При рассмотрении любой речной долины наблюдается иерархия водотоков и прилегающих территорий, которые образуют сеть самоподобных долин. Таким образом возникает фрактальность строения долин речных систем.

Степенная зависимость длины произвольной географической кривой от масштаба измерения впервые был обнаружен Л. Ричардсоном в 1961 году. Через 7 лет Б. Мандельброт объяснил данное свойство, используя фракталы, что и являлось началом изучения береговых линий и гидрологических объектов рассматриваемым методом [Мельник].

Фрактал (от лат. fractus – фрагментированный, неправильный по форме) – это бесконечно самоподобная геометрическая фигура, каждый инвариант которой подобен целому при произвольном изменении масштаба. Фракталы являются сугубо математическим понятием, и как математические объекты обладают массой чрезвычайно интересных свойств, в то же время применение фрактального аппарата в исследовании объектов различной природы позволяет выявить совершенно новые характеристики и определить их глубокую физическую сущность. Использование фрактальной теории, основанной на целостном представлении объекта как совокупности элементов, взаимосвязь которых порождает свойство самоподобия, весьма эффективно как для описания морфологии рельефа, так и для выявления закономерностей динамики геоморфосистем [Мельник, Поздняков, 2008].

Фрактальные свойства характерны как для водотока русла, так и для разветвленных долин речных систем. По этой причине методы фрактального анализа применимы как при рассмотрении самоподобия целостных структур речных систем, так и на отдельных морфологически однородных участках долин рек. Общие закономерности, лежащие в основе меандрирования и бифуркации русла, действуют на всех уровнях речной системы, тем самым порождая ее самоподобную морфометрию. Такая фрактальность

сохраняет некое качество природных структур при изменении пространственных масштабов, так как свойство автомодельности является существенным фактором в исследовании формы и, как следствие динамики процессов их образования, упрощает математическое моделирование задачи.

При изучении фрактальных кривых справедлива формула, связывающая длину этой кривой с масштабом измерения:

$$L = \lambda m^{1-D_H} \quad (1)$$

где L – длина кривой; m – масштаб измерения (цена деления измерителя); λ – масштабный множитель, определенный для каждой конкретной фрактальной линии; D_H – фрактальная размерность данной кривой.

Рассмотрим свойство самоподобия фрактальных кривых – любой участок кривой имеет ту же величину фрактальной размерности, что и вся кривая. Это свойство можно представить в виде следующей формулы:

$$KL = \lambda(k_m)^{1-D_H} \quad (2)$$

где k – коэффициент, количественно характеризующий цену деления измерителя (раствор циркуля).

Следуя из данной формулы, при измерении длины кривой, в k раз длиннее изначального участка. Если прологарифмировать данное выражение мы получим следующую формулу:

$$\lg(L) = \lg(\lambda) + (1 - D_H)\lg(m) \quad (3)$$

В общем случае, долины речных систем представлены в стволовом или древовидном виде. Для первых характерно предельно малое количество водотоков. Данный вид является типичным для верховьев рек. При рассмотрении долин более крупных речных систем сохранение этого типа минимизируется. Однако свойство фрактальности долин речных систем имеет относительный характер. Стволовой рисунок речной сети характерен для некоторых озерных рек. По мере увеличения размера речной системы, увеличивается вероятность древовидного строения речных долин. Степень выраженности древовидного строения речной сети определена ее симметричностью. Симметричность или асимметричность русловой сети территории зависит от соотношения площади водосборов право- ($F_{пр}$) и левобережных ($F_{л}$) притоков. При условии $F_{пр} = F_{л}$ древовидная русловая сеть симметрична. Однако чаще встречаются ассиметричные речные сети ($F_{пр} \neq F_{л}$). Стоит упомянуть, что свойство фрактальности долин речных систем имеет относительный характер.

Для нахождения количественного показателя выраженности симметричности или асимметричности очертания границ долин русловых систем имеет место быть как отношение между суммарной площадью бассейнов правобережных и левобережных притоков. Если при решении неравенства имеется следующий результат: $0,5 < \Sigma F_{пр} / \Sigma F_{л} < 2$, то речная сеть имеет симметричное строение. В том случае, когда показатель имеет вид $\Sigma F_{пр} / \Sigma F_{л}$

$<0,5$, то это говорит о том, что сеть речных долин имеет левостороннюю, а при $\Sigma F_{пр}/\Sigma F_{л} > 2$ – правостороннюю асимметрию [Алексеевский и др.].

В рамках исследования были рассмотрены долины рек Аниш и Була, протекающих на территории Чувашской Республики. Аниш является рекой, расположенной в зоне смещенных и широколиственных лесов в северной части Чувашии, Була находится в степной зоне и расположена в южной части республики. А в связи с этим использование данных рек в качестве примера вполне релевантно. Ранее в своих исследованиях вопросами асимметрии рек в Поволжье детально занимались казанские ученые А.П. Дедков, Г.П.Бутаков и др.

Следует из проведенных расчетов, река Була имеет симметричное, а река Аниш – ассиметричное строение. Данный вывод был сделан после использования неравенства, приведенного выше. Река Аниш является рекой с несильно выраженной левосторонней асимметрией, т.к. коэффициент ее асимметрии составил 0,5. Наблюдается предвершинный характер расположения притоков и постепенное их обеднение по мере продвижения от истока к устью реки, особенно это ярко выражено уже на дельте реки, где крупных притоков почти не наблюдается (рис. 1).

Для реки Була, данный показатель находится на уровне 0,47, что составляет незначительный уклон от состояния симметричности. Данную реку можно отнести по своей структуре к равномерным, т. к. на протяжении всей реки, за исключением центральной части, наблюдается одинаково равное распределение притоков (рис. 1).

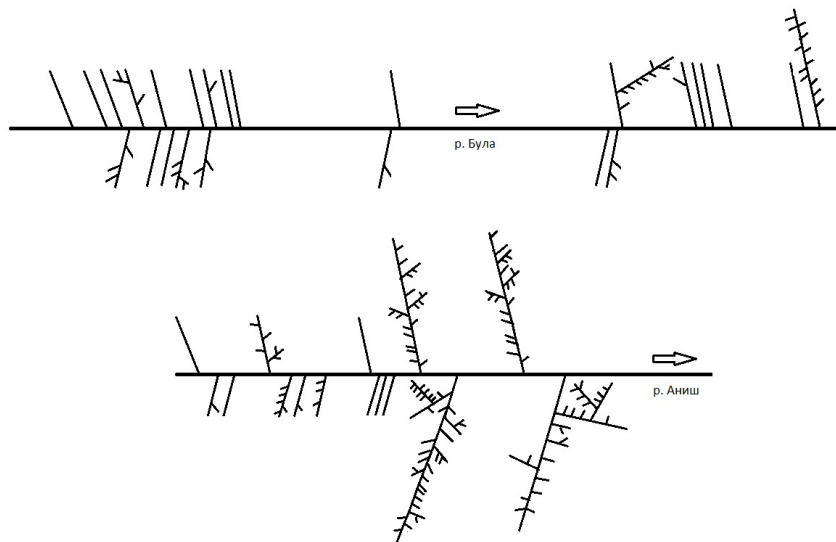


Рис. 1. Очертания границ долин русловых систем рек Була и Аниш

Из рассмотренных рек, долина реки Аниш представляет больший интерес для дальнейшего исследования, т. к. она имеет более разветвленную и широкую сеть, что предоставляет большие возможности для масштабирования.

На основе результатов данного исследования, была подтверждена возможность применения рассмотренных методов в дальнейшем для более углубленного и детального изучения речных систем Чувашской Республики, т. к. результаты этой работы могут не совпадать с реальным положением из-за небольшой выборки.

ЛИТЕРАТУРА

Мельник М.А., Поздняков А.В. Автоколебания в эрозионном фрактальном расчленении рельефа // Геоморфология. 2008. № 3. С. 86--95.

Мельник М.А. Фрактальный анализ извилистости рек (на примере Томской области) // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/fraktalnyy-analiz-izvilistosti-rek-na-primere-tomskoy-oblasti/viewer>

Алексеевский Н.И., Косицкий А.Г., Христофоров А.В. Фрактальные свойства речных систем и их использование в гидрологических расчетах // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19058920>

А.Г. Шарифуллин, к.г.н., доцент

Казанский (Приволжский) федеральный университет

ЭРОЗИОННО-АККУМУЛЯТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛОЖБИНАХ МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ ВОСТОКА РУССКОЙ РАВНИНЫ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 250 ЛЕТ

(научный руководитель – д.г.н., в.н.с. В.Н.Голосов)

Большое распространение на территории Русской равнины получили ложбины. Основная особенность данных эрозионных форм – это концентрация стока воды, что усиливает эрозионно-аккумулятивных процессы и снижает плодородие почвы. Небольшая глубина и пологие склоны ложбин позволяет использовать их в качестве пашни. В результате многовековой распашки земель, а также изменения климата, происходило усиление/ослабление эрозионно-аккумулятивных процессов, что нашло отражение как в самих ложбинах, так и верхних горизонтах почв. В данной работе дается оценка эрозионно-аккумулятивных процессов на склонах и днищах ложбин и потяжин в пределах малого водосбора востока Русской равнины за последние 250 лет.

В качестве объекта исследования был выбран малый водосбор Темева речка, расположенный в пределах бассейна реки Мёша (правый приток р. Кама). Площадь исследуемой части водосбора – 1,13 км². Абсолютные

высоты изменяются от 122 до 192 м. В геологическом отношении территория сложена породами пермской системы (известняки, доломиты, мергели), перекрытыми делювиально-солифлюкционными суглинками [Дедков, 2003]. В днище балочной сети Темева речка наносы поступают в основном по сети эрозионных форм (ложбины, лощины, потяжины). Густота данных эрозионных форм составляет 5 км/км². Средняя длина их составляет 273 м (табл. 1).

Таблица 1. Параметры ложбин и их водосборов

№ ложбины	Длина основной ложбины, м	Профиль тальвега	Экспозиция склонов, на которых развивается ложбина
1	184,9	вогн	СВ-В
2	198	прям	З
3	245	прям	З
4	124	прям	З
5	352,4	прям	СВ-В
6	192	прям	З
7	258	прям	З
8	120	прям	СЗ
9	163,8	вып	З-ЮЗ
10	252,9	вып	СВ-В
11	249,6	вып	З-ЮЗ
12	220,2	вып	В
13	512,6	вып	СВ-В
14	1010	прям	СВ
15	1268,1	прям	СЗ

Продольные профили большинства ложбин – прямые и выпуклые, реже – вогнутые. Климат изучаемой территории умеренно континентальный с теплым летом и умеренно-холодной зимой. Средняя годовая температура (по данным метеостанции Казань-опорная) составляет +3.5 °С, среднегодовое количество осадков – около 470 мм. Основные почвы исследуемой территории – серые и светло-серые лесные почвы [Почвенная карта Татарской АССР].

Оценка темпов эрозионно-аккумулятивных процессов проводилась на основе использования радиоцезиевого и почвенно-морфологического методов. Cs-137 долгоживущий изотоп искусственного происхождения, который появился в результате испытания ядерного оружия в открытой атмосфере в начале 50-х гг. XX в. Наибольшее количество испытаний было проведено в 1958 и 1962 гг. [Израэль, 1996]. После запрета на проведение атмосферных ядерных испытаний, поступление Cs-137 происходит преимущественно вследствие аварий на атомных электростанциях (Например, авария на Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года). В пределах водосбора Темева Речка наблюдались как глобальные, так и чернобыльские выпадения, примерно сопоставимые по величине значениями [Шарифуллин и др., 2019]. Первоначальное осаждение Cs-137 и последующее его переотложение на склонах, днищах долин и на поймах привели к сложной картине рас-

пределения Cs-137 в водосборе. Данные ограничения могут быть частично преодолены благодаря использованию почвенно-морфологического метода, который позволяет оценивать интенсивность смыва почв с момента хозяйственного освоения территории. Существенным недостатком метода является зависимость точности результатов от морфологии почвенного профиля – общей мощности перегнойно-аккумулятивных горизонтов почв различных генетических типов. Маломощный гумусовый горизонт при распашке сразу же смешивается с нижележащим подзолистым или иллювиальным горизонтами, которые обладают большой естественной вариабельностью мощности [Егоров, 2009].

Оценка эрозивно-аккумулятивных процессов в пределах ложбин была осуществлена в несколько этапов. На первом этапе была произведена съемка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с целью получения цифровой модели рельефа исследуемого водосбора. Съемка осуществлялась в автоматическом режиме путем загрузки полетного задания в контроллер БПЛА (DJI Phantom 4). Для водосбора полет осуществлялся на высоте 50 м от точки взлета с 70% продольным и поперечным перекрытием снимков.

По полученным результатам съемки были выбраны места отбора проб на распахиваемых склонах водосбора вдоль тальвега 8 крупных ложбин и по нескольким поперечным им профилям были отобраны интегральные образцы почвы (N = 47) на глубине 0–30 см для определения в них содержания Cs-137 (рис. 1Б).

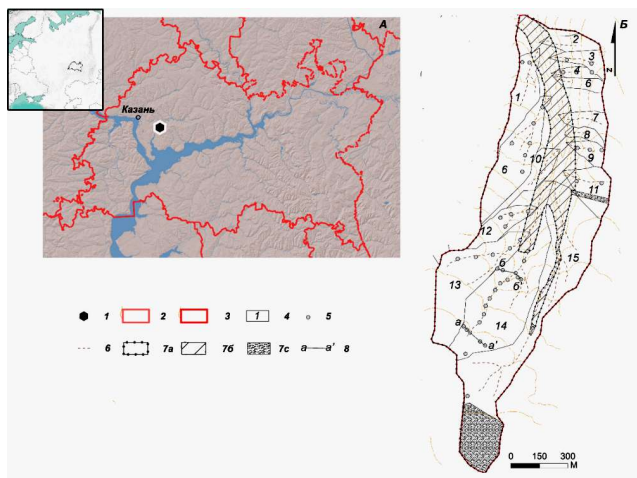


Рис. 1. Места отбора проб на распахиваемых склонах водосбора. А. Карта суммарного загрязнения цезием-137, Б. Карта фактического материала. 1 – балка Темева речка, 2 – административные границы; 3 – граница исследуемого водосбора; 4 – граница ложбинных водосборов; 5 – места отбора проб; 6 – тальвеги ложбин; 7 – тип землепользования (а – пашня, б – луг, в – лес и лесополоса); 8 – поперечные профили).

Одновременно в местах отбора образцов определялась мощность гумусового горизонта P + AEL ($A_{п}+A_1A_2$). Для определения эталонного значения Cs-137 в верховьях водосбора были отобраны 6 образцов.

В лабораторных условиях все отобранные образцы высушивались, размалывались и просеивались через сито. В подготовленных для анализа пробах содержание Cs-137 измерялось на коаксиальном германиевом гамма-спектрометре с погрешностью 5-10% на базе НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И Маккавеева (МГУ).

По итогам лабораторных работ в каждой точке была определена удельная активность Cs-137, запас Cs-137, определена масса смытой в течение года почвы с 1963 по 2018 гг. по следующей формуле:

$$Y = \frac{BdX}{10t}$$

Y – масса смытой почвы, т/га в год; B – плотность почвы, кг/м³; d – мощность пахотного горизонта, м; X – уменьшение содержания цезия 137 в точке ($A_{ref}-A$)/ $A_{ref} \times 100$, где A_{ref} – эталонное значение Cs-137, Бк/м²; A – значение Cs-137 в точке, Бк/м², t – количество лет с начала выпадения Cs-137.

В качестве эталона мощности гумусового горизонта (AY+BEL) серых лесных почв использовалось значение 34 см, которая была получена по данным А.А.Валеевой [Валеева и др., 2008] исходя из 79 разрезов в пределах лесостепной зоны Среднего Поволжья.

В ходе исследования были получены следующие результаты.

В пределах исследуемого водосбора по морфологическим, морфометрическим характеристикам рельефа (табл. 2) можно выделить 4 типа ложбин. Первый тип – это длинные ложбины (лощины, длиной более 1000 м) с малыми уклонами днища (0,03-0,04), большой площадью водосбора и полигенетического происхождения, расположенные на юге исследуемого водосбора (№№14, 15).

Таблица 2. Распределения Cs-137 и мощности гумусового горизонта

Тип лож-	Верхняя часть днища (N=12)		Средняя часть днища (N=11)		Нижняя часть днища (N=12)		Для всех типов ложбин (N=35)		Склоны водосбора (N=12)	
	Cs, Бк/кг	Hum, см	Cs, Бк/кг	Hum, см	Cs, Бк/кг	Hum, см	Cs, Бк/кг	Hum, см	Cs, Бк/кг	Hum, см
I	8,8	34,3	14,7	55,5	13,8	43	12,4	44,3	9,3	28,8
II	16,2	26	6,4	45	5,8	18	9,5	29,7	--	--
III	4,1	24,5	8,7	40	3,1	28	5,3	30,8	--	--
IV	11,8	32,5	12,7	36,2	7,1	46,2	10,5	38,3	--	--

Второй тип включает не глубоко врезанные (менее 0.5 м) короткие потяжины на относительно более крутых склонах западной экспозиции (№№2, 3, 4, 6, 7, 8). Ложбины 8, 9 и 10 относятся к третьему типу, отличаясь от второго типа более глубоким врезанием (1-2 м) и выпуклым профилем тальвега. Остальные ложбины. восточной и северо-восточной экспозиции.

имеют совершенно другую структуру формирования стока. Сток концентрируется в отдельных притоках, а затем они постепенно сливаются, образуя единое русло.

Опорное значение удельной активности Cs-137 (2364 ± 205 Бк/м²) соответствует значению суммарного загрязнения (глобальное выпадение+авария на Чернобыльской АЭС) для данной местности [Израэль, 1998]. По сравнению с эталоном потери Cs-137 изменяются от 14% до 182%. Среднее значение удельной активности ¹³⁷Cs в пахотной части водосбора оценивалось в 10.5 ± 1.5 Бк/кг. Сравнение данного показателя в почвах распаханых склонов показало значительные его вариации внутри водосбора с диапазоном от 2.0 до 25.6 Бк/кг. Максимальная удельная активность наблюдается в ложбинах I, минимальная – III типа (табл. 2). Содержания Cs-137 в образцах в целом по длине увеличивается от верхних частей к средним и далее снижается, кроме ложбин II типа, которые характеризуются наличием максимума в верхней части (16.2 Бк/кг), что с учетом вариабельности сопоставимо со значением опорного участка. Скорее всего, такое содержание связано с особенностями распашки на данном участке. Пересчет удельной активности цезия в темпы эрозии/аккумуляции по пропорциональной модели (с 1963 года) позволяет получить следующие результаты. В среднем в пределах исследуемого водосбора темпы эрозии составляют 1.5 т/га в год. Наибольшие темпы эрозии наблюдаются по всей длине ложбин III типа с выпуклым профилем (3-4 т/га в год); сопоставимые значения также характерны для верхних частей ложбин I, средней II и нижней части ложбин II и IV типа. В пределах средней распаханной части днища ложин выявлены участки чередования эрозии и аккумуляции со скоростями 0.5 т/га в год. Наибольшие темпы аккумуляции (1 т/га в год) наблюдаются в вершине и в низовье ложбин II типа.

Пространственное распределение мощности гумусового горизонта почв водосбора в целом совпадает с распределением поля удельной активности в нем Cs-137, несмотря на низкий коэффициент корреляции ($r=0.46$). Лишь в ложбинах IV типа и в нижней части II и III типов оно нарушается (табл. 2). Значение мощности гумусового горизонта (AY+BEL) меняется в пределах водосбора от 18 до 72 см, составляя в среднем 39.3 ± 5.7 см? что выше средних значений незатронутых серых лесных почв (AY+BEL=34 см). Наибольшие значения наблюдаются в средней и нижней части днища (36-55 см), наименьшие – в верхней части ложбин, расположенных в восточной части водосбора (25-43 см) и на склонах ложбинных водосборов (25-29 см) (табл. 2). У нижнего края пашни ложбин II типа мощность гумусового горизонта достигает 72 см. Аномальный пояс аккумуляции протягивается вдоль всего склона водосбора западной экспозиции и связан с аккумуляцией и близким залеганием грунтовых вод. Для остальных днищ изменения мощности гумусового горизонта обусловлены комплексом причин и невозможно их сравнить с опорными значениями гумусового горизонта для данного типа почв. Исходя из полученных значений по мощности гумусового горизонта можно сказать, что с момента хозяйственного освоения водосбора в

днище большинства ложбин преобладает аккумуляция. Наибольшая интенсивность эрозионных процессов характерна для днищ ложбин, расположенных в восточной части водосбора (II и III), а аккумулятивных процессов – для лощин в южной части водосбора. Средние темпы смыва на склонах ложбин, согласно данным по мощности гумусового горизонта составили 7.9 т/га в год или 605 т/год.

Результаты оценки темпов почвенной эрозии и перераспределения ее продуктов, полученные по радиоцезиевому и почвенно-морфологическому методам, для территории одного из малых водосборов лесостепной зоны востока Русской равнины позволяют выделить несколько типов ложбин. Относительно молодые ложбины западной экспозиции с выпуклыми склонами и преобладанием эрозионных процессов в их днище. Относительно древние и длинные ложбины северной экспозиции, через которые осуществляется транзит наносов с пахотных угодий. И ложбины восточной экспозиции с несколькими притоками, соединяясь, образуют единое русло в нижней части днища, которые активно размываются в последние десятилетия. Суммарная потеря почвы за весь период хозяйственного освоения составляет на склонах ложбин 5-8 т/га в год, сопоставимые темпы характерны для периода с 1963 по 2018 гг.

ЛИТЕРАТУРА

Валеева. А. А., Александрова. А. Б., Копосов. Г. Ф. Серые лесные почвы Республики Татарстан // Уч. зап. Казанского университета. Сер.. Естественные науки. 2011. – №153 (2). – С. 238-249.

Геологическая служба США (LandsatLook Viewer) URL: <https://landsatlook.usgs.gov>. Дата обращения: 01.03.2022

Дедков А.П. Неотектоника и геоморфология Татарстана // Геология Татарстана: стратиграфия и тектоника М.: ГЕОС. 2003. С. 337-364.

Егоров И. Е. Полевые методы изучения почвенной эрозии // Вест. Удмур. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2009. – №1.

Израэль Ю.А. Атлас радиоактивного загрязнения Европейской части России. Белоруссии и Украины. Федеральная служба геодезии и картографии России. М: Роскартография, 1998. 142 с.

Израэль Ю.А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. СПб.: Прогресс-Погода, 1996. 355 с.

Почвенная карта Татарской АССР. М-6 1:600000. Гос. агропромышленный комитет РСФСР, 1985.

Шарифуллин А. Г., Гусаров. А. В., Голосов В. Н. Современный тренд эрозионно-аккумулятивных процессов в малом распаханном водосборе. Республика Татарстан // Геоморфология. – 2018. – № 3. 93-108.

СЛЕДЫ ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВОЙ ПАВОДКОВОЙ ЭРОЗИИ НА ПОЙМЕ ВЕРХНЕГО ДНЕПРА (СМОЛЕНСКАЯ ОБЛАСТЬ)*

(научный руководитель – д.г.н. А.В. Панин)

Данная работа посвящена изучению форм эрозионного рельефа на пойме верхнего Днепра в районе Смоленска, на участке в 10 км ниже по течению от города. Объектом исследования являются замкнутые и полузамкнутые котловины, наблюдаемые на исследуемой территории (рис. 1).

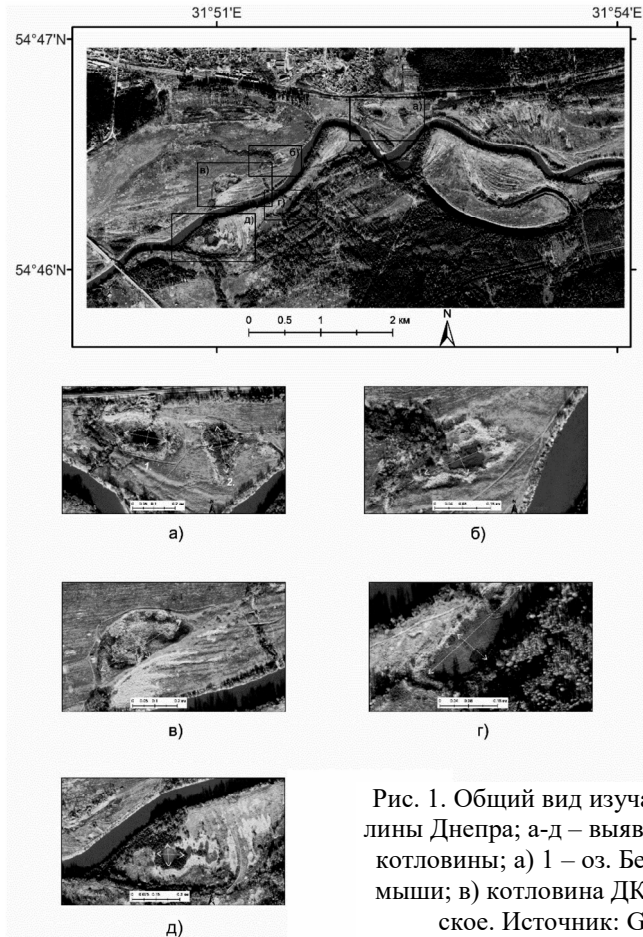


Рис. 1. Общий вид изучаемого участка долины Днепра; а-д – выявленные пойменные котловины; а) 1 – оз. Бездонка, 2 – оз. Камыши; в) котловина ДКГ; д) оз. Демидовское. Источник: Google-карты.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФ (проект 22-27-00639).

С помощью дешифрирования космических снимков из открытых источников (Google и Яндекс карты) на изучаемом участке выделено 6 подобных форм. Размеры таких котловин достигают от 50 до 300 м в длину и 50-150 м в ширину. По форме они, как правило, изометричные, либо вытянутые вдоль течения. Глубина лежит в диапазоне 1-3 м (по собственным наблюдениям). Подобные формы не встречаются на других участках долины. Морфология описанных форм заставляет задуматься о механизме их формирования. Среди механизмов образования котловин на пойме можно назвать несколько: 1) старичный, 2) паводковой эрозии, 3) ледовой эрозии, 4) антропогенный.

Интерес к пойме Днепра в данном районе вызван нахождением на ней раннесредневекового археологического памятника Гнёздово. Культурный слой одного из поселений комплекса уходит в пойменные озера Бездонка и Камыши (рис. 1а), происхождение которых стало предметом предшествующих исследований [Бронникова и др., 2018]. Нами же были изучены ещё две подобные котловины: полузамкнутая котловина ДКГ и озеро Демидовское ниже по течению (рис.1в, д). В ходе полевых работ описаны геоморфологическая позиция котловин, их строение, отобраны образцы органического вещества (растительные остатки *in situ* либо осадок, содержащий органику) на радиоуглеродное датирование.

Гипотеза возникновения котловин Бездонки и Камыши, высказанная ранее [Бронникова и др., 2018] состоит в том, что эти котловины созданы паводковой эрозией во время экстремально высоких половодий Днепра. О формах паводковой эрозии на пойме писал Н.И. Маккавеев [2003, с. 242]: «Воды высокого половодья производят значительную аккумуляцию и эрозию и на поверхности высокой поймы. Размыв пойменной поверхности нередко начинается с образования ям эллиптической формы, имеющих глубину в несколько метров. Длинная ось таких ям ориентируется по течению. Цепочки ям объединяются затем в ложбину, иногда остающуюся тупиковой, но чаще соединяющуюся с меженным руслом реки».

В данной работе проверено, является ли такой механизм причиной возникновения двух других пойменных западин.

Водный режим верхнего Днепра характеризуется высоким весенним половодьем (5-8 м, до 9-12 м в сужениях долины), низкой летней меженью, периодическими летними и особенно осенними паводками (с подъёмом уровня на 3-4 м) и зимней меженью. Высокие весенние расходы реки определяются преобладанием снегового питания [Алексеевский, Жук, 2020]. Днепр в районе археологического комплекса Гнёздово имеет меандрирующее, местами спрямлённое, русло с широкой поймой, возвышающейся над меженным уровнем реки до высоты 8-9 м, и двумя надпойменными террасами (НПТ), первая из которых прослеживается по обоим берегам почти непрерывно, а вторая – фрагментарно. Высоты террас: 10-13 м первая НПТ, 13-15 м вторая НПТ [Panin et al., 2014, 2015]. Возраст нижней террасы позднеледниково-голоценовый, а верхняя терраса сформировалась в ранне- и средневалдайские эпохи, соответствующие в глобальной изотопно-

кислородной шкале морским изотопным стадиям (МИС) 4-3. Ширина русла на изучаемом участке составляет 80-100 м, а средняя ширина пояса меандрирования составляет 450 м. Выше и ниже по течению долина Днепра сужается, а русло перестаёт свободно меандрировать. Выше по течению, в районе Смоленска, Днепр находится в условиях ограниченного меандрирования, ширина пойменных сегментов не превышает 200 м. Ниже по течению, где Днепр меняет направление течения с западного на юго-западное, меандры не наблюдаются, русло почти прямолинейно, с редкими изгибами, долина сужается, ширина односторонней поймы не превышает 100 м. Изменение морфодинамического типа русла связано с морфологией долины, которая в свои очередь зависит от геологической и геоморфологической неоднородности пересекаемых ледниковых комплексов.

Озёра Бездонка и Камыши – наиболее изученные эрозионные котловины. Они расположены на выпуклом пойменном сегменте (рис. 26), на высотах соответственно 4 и 7 м относительно меженного уреза Днепра. Котловина оз. Бездонка имеет овальную форму, длинной осью вытянута с северо-запада на юго-восток примерно на 180 м. Бездонка имеет глубину до 2,2 м. От озера отходят два канала стока: через прирусловой вал перпендикулярно современному руслу Днепра, и в речку Свинец - небольшой правый приток Днепра. Котловина Камышей вытянута по направлению север-юг, она состоит из двух отдельных ложбин глубинами до 1 м и общей длиной около 220 м. Котловины Бездонки и Камышей сложены иным материалом по сравнению с разделяющим их валом [Бронникова и др., 2018]. Это песчано-супесчаные слои, сменяющиеся кверху суглинками, торфами и илами. Самые нижние песчаные слои, выстилающие дно котловин, находятся на глубине 7-8 м от поверхности поймы, что соответствует глубинам ниже современного уреза Днепра на 1-2 м. Эти песчаные слои можно соотнести с русловым аллювием, время отложения которого соответствует эрозионной выработке котловин озёр. Датировки заполняющих котловины осадков, а также коррелятных отложений, указывают на эрозионное событие между 2400 и 2700 лет назад. Пески разделяющего озёра вала оказались древнее - 4000 лет назад [Бронникова и др., 2018]. С юга (ближе к руслу) озёра отделены ещё одним прирусловым валом от более молодого ложбинно-грядистого участка поймы.

Котловина ниже по течению – или котловина ДКГ (так как она расположена в пределах Днепровской курганной группы гнёздовского археологического комплекса) – также приурочена к пойме. Она сильно вдаётся в край террасы, формируя цирковидную выемку (рис. 1в; рис. 2: *“высокая пойма (цирковидный сегмент)”*). В данной выемке нет озера, хотя и существует значительное локальное переувлажнение. Высота котловины над меженным урезом Днепра – всего 3,5-5 м. Выемка вытянута с северо-востока на юго-запад (как и направление течения Днепра), имеет длину около 270 м и огорожена с южной стороны прирусловым валом, а с остальных сторон – уступами террасы и раннеголоценовой поймы. Таким образом, данная выемка представляет собой полузамкнутую котловину, имеющую канал стока в виде прорана через прирусловой вал. Строение котловины ДКГ (рис. 2)

схоже с таковым у Камышей и Бездонки. Глубина эрозионной проработки значительна: русловой аллювий, зафиксирован на глубинах 6-9 м под современным урезом Днепра, а общая мощность отложений составляет 13 м. Самый нижний слой аллювия представлен песками, они сменяются субаквальными алевритами и суглинками, насыщенными органическим веществом, а у поверхности залегает пойменный суглинистый аллювий. Примерное время возникновения данной формы – 2,2–2,3 тыс. лет. На это указывают радиоуглеродные датировки скв. 19507 и 19505: 2230 ± 50 кал.л.н. из руслового аллювия предшествующего этапа осадконакопления и 2220 ± 60 кал.л.н., 2290 ± 60 кал.л.н. из вышележащих суглинков и алевритов (рис. 2).

Озеро Демидовское – самое маленькое из всех, оно имеет округлую форму, размеры 80 на 70 м (рис. 1д). Озеро расположено на молодой сегментно-гривистой пойме, высота которой колеблется от 1 м в межгривных понижениях до 4-5 м на осях грив и прирусловом вале. Озеро совсем не глубокое – глубина до 1 м, а высота над меженным урезом Днепра составляет всего лишь 1 м. Дно сложено плотными слоистыми супесями, что указывает на тесную связь озера и русла реки. Судя по имеющимся признакам, Демидовское образовалось позже, чем описанные выше котловины. Возможно, и механизм образования озера иной. Из-за недостатка данных о строении и возрасте отложений Демидовское не может быть проанализировано наравне с Бездонкой, Камышами и котловиной ДКГ.

Исходя из данных о строении и возрасте трёх изученных котловин (Бездонка, Камыши и котловина ДКГ), можно обобщить следующее: на рубеже суббореального и субатлантического периодов (2700-2200 л.н.) отмечается повышение паводковой активности Днепра и формирование изометричных, либо вытянутых по течению, эрозионных форм рельефа. Они образованы на месте размытого края террасы и, вероятно, размытого основания поймы. В цирковидной выемке ДКГ, углублённой происходило до уровня -9 м от современного уреза Днепра, котловины озёр Бездонка и Камыши были углублены эрозией до – 1-2 м. Настолько глубокая эрозия могла произойти только в половодье. Эрозионная активность полых вод могла усилиться при определённых условиях, а именно: 1) экстремальной (относительно современных) высоте и продолжительности половодья, 2) возможно, прохождении целой серии экстремальных половодий, а также 3) благоприятной для размыва конфигурации поймы – ее сужении вниз по течению, что приводит к росту удельных расходов воды и скоростей течения. Нельзя исключать вклад льдин и ледовых заторов. Затянутый вглубь поймы плывущий лёд способен выпахивать поверхность поймы, разрывая дерновый покров и откладывая переносимые песок или более крупный материал. В глубине пойменного массива возможен ещё один эрозионный процесс: сталкивающиеся течения и противотечения образуют водовороты, высверливающие эрозионные котлы [Чалов, 2016].

Округлые очертания озёр и котловин указывают, всё же, на преобладание водной, а не ледовой эрозии. Скорее всего, пойма, подвергшаяся размыву, была сложена песчаными или алевритовыми наносами, слабозадернована, либо с нарушенными льдинами дерновым покровом.

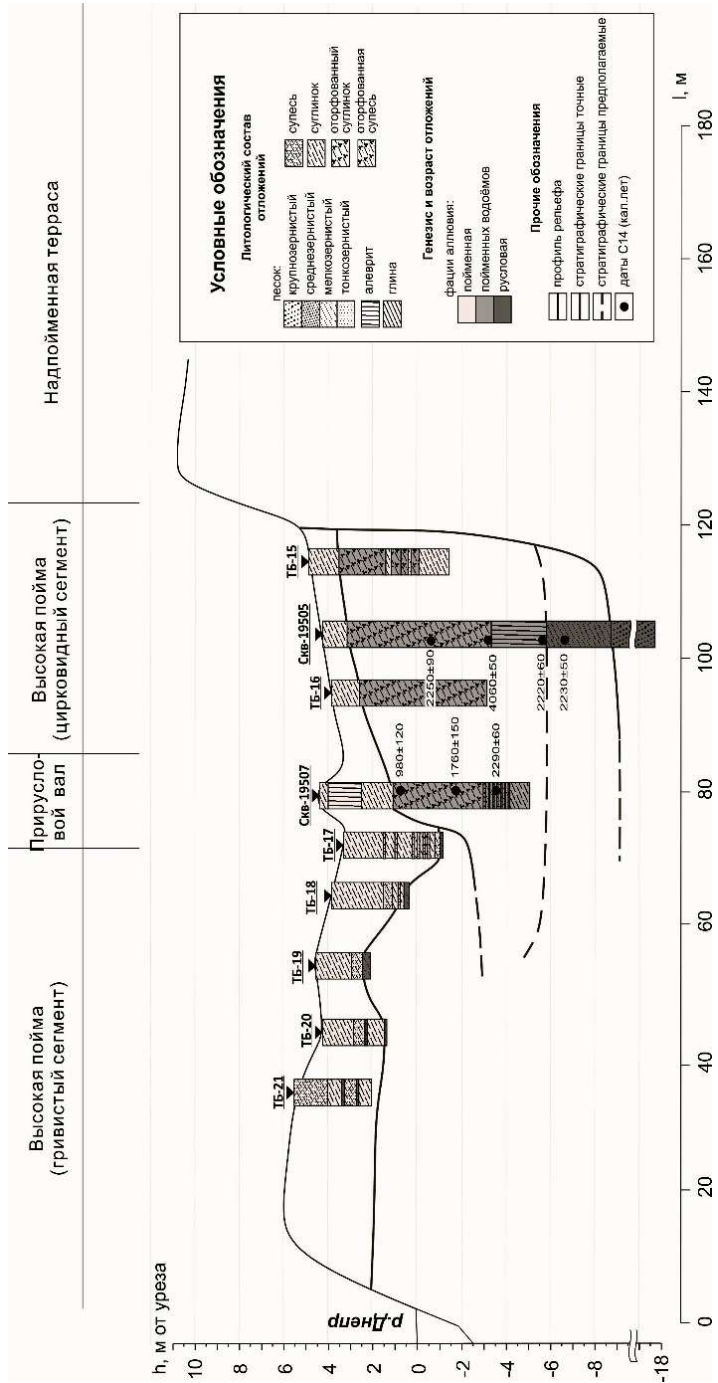


Рис. 2. Схематическое строение котловины ДКП

Вероятно, её относительная высота была меньше современной на мощность накопившейся позднее пойменной фации (около 1-1,5 м по Бронникова и др., 2018). Русло за счет аккумуляции в среднем голоцене могло быть на 1-2 м выше современного [Rapin et al., 2015].

Реконструируя дальнейшую историю развития котловин, можно заключить следующее. Котловина ДКГ, вероятно, была замкнутой после возникновения, в ней начало формироваться озеро, затем затапливаемое болото и наконец аллювиальная поверхность поймы. Осадконакопление на данной пойме происходило на протяжении последних 2 тыс. лет при сильном обводнении, что может быть связано с разгрузкой грунтовых вод в тыловом шве террасы. По мере накопления аллювиальной толщи в котловине, происходила её эрозионная переработка: боковой размыв руслом реки и паводковый размыв поверхности, который определил наклон кровли фации аллювия пойменных водоёмов (рис. 2). Вероятно, котловина на какое-то время утратила свою замкнутость, но с накоплением толщи аллювия прируслового вала, огораживающего котловину от более молодого пойменного сегмента, снова её приобрела.

Котловины озёр Бездонка и Камыши были углублены не так сильно, как ДКГ. После своего возникновения они были сначала переувлажнёнными участками низкой поймы, далее, по мере осадконакопления, становились суше. Около 2 тыс.л.н. котловина Бездонки оказалась изолирована прирусловым валом, что послужило началом функционирования озера, не пересыхающего в межень [Бронникова и др., 2018]. Подобное событие на ДКГ произошло почти на тысячу лет позже.

Исследование строения и возраста отложений котловин озёр Бездонка, Камыши и котловины ДКГ позволяет заключить, что около 2700-2200 л.н. на изученном участке долины Днепра половодья имели экстремальных характер. Эрозия полых вод выработала серию изометричных либо вытянутых по течению глубоких котловин на месте размыва основания поймы. После возникновения котловины развивались по-разному: оставались замкнутыми, либо размывались боковой эрозией русла реки. Тенденции осадконакопления и развитие пойменного рельефа предопределили современный вид котловин.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеевский Н.И., Жук В.А. Днепр [Электронный ресурс]. Научно-популярная энциклопедия «Вода России». Дата обращения: 05.02.2020 https://water-rf.ru/Водные_объекты/353/Днепр

Бронникова М.А., Панин А.В., Шеремяцкая Е.Д., Борисова О.К., Успенская О.Н., Пахомова О.М., Мурашева В.В., Беляев Ю.Р., Бобровский М.В. Формирование поймы Днепра в районе Гнёздовского археологического комплекса в среднем и позднем голоцене. Гнездовский археологический комплекс // *Материалы и исследования. Вып. 1. Тр. Государственного исторического музея. Вып. 210. 2018. С. 28-67.*

Маккаевеёв Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Географ. ф-т МГУ, 2003, 355 с.

Чалов Р.С. Русловые процессы (русловедение). М.: ИНФРА-М, 2016, 565 с.

Panin A. V., Adamiec G., Arslanov K. A., Bronnikova M. A., Filippov V. V., and Sheremetskaya E. D. Absolute chronology of fluvial events in the upper Dnieper river system and its palaeogeographic implications. *Geochronometria*, 41(3), 2014, pp. 278–293

Panin A. V., Adamiec G., Filippov V. V. Fluvial response to proglacial effects and climate in the Upper Dnieper valley (western Russia) during the Late Weichselian and the Holocene. *Quaternaire*, 26, (1), 2015, pp. 27-48

Д.И. Школьный, научный сотрудник

А.С. Цыпленков, к.г.н., младший научный сотрудник

П.П. Головлев, младший научный сотрудник

Е.И. Бахарева, магистрант

А.М. Антонюк, магистрант

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ОСОБЕННОСТИ ВОДНОГО И РУСЛОВОГО РЕЖИМА РЕКИ АНАДЫРЬ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ 2020-2022 ГОДОВ* (научный руководитель – д.г.н, проф. Р.С. Чалов)

Река Анадырь – основная воднотранспортная артерия Чукотского автономного округа, 29-я река России по объему стока воды и 2-я по размерам река российского Тихоокеанского бассейна после Амура. Бассейн реки в настоящее время является одним из основных мест расселения на Чукотке вне побережий – здесь располагаются 7 национальных сел Анадырского района с общим числом жителей около 2,5 тысяч. Отсутствие в настоящее время круглогодично действующей транспортно-дорожной сети приводит к сложностям с логистикой и обеспечением населенных пунктов необходимыми для функционирования товарами и топливом. Освоение природных ресурсов в бассейне реки Анадырь, развитие производительных сил края во многом также зависит от состояния развития водного транспорта. Низкое стояние уровней воды в межпаводочный период часто лимитирует судоходство, которое осложняется тем, что река Анадырь изобилует большим количеством перекатов, а в среднем течении разветвляется на много рукавов и проток.

Водный режим реки характеризуется коротким периодом стока, не превышающим 5 месяцев. Весеннее половодье преимущественно характе-

* Исследования выполнены по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккаевеёва (№121051100166-4) и кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке РФФ (проект 18-17-00086 П)

ризуется одним растянутым пиком, объединяющим паводочные волны притоков, и талые снеговые воды, заполняющие обширные пойменные пространства в бассейне реки. За период половодья проходит до 70% от годового стока реки. В некоторые года на реках бассейна р. Анадырь максимумы паводков превышают максимум половодья, однако по мере приближения к устью реки паводочные волны распластываются.

Река Анадырь, несмотря на активное хозяйственное использование, по настоящее время остается слабоизученной. Данные многолетних наблюдений за уровнем по бассейну отрывочны, измерения расходов в бассейне не ведутся с 1996 года. В настоящее время в бассейне действует 6 уровней постов, особенности расположения которых не позволяют в достаточной мере анализировать изменчивость водного режима в пределах бассейна. Русловой режим реки специально не изучался. Единственная информация о состоянии русла может быть получена из лоцманских карт, содержащих съемки 1972 и 1988 годов. Путевые работы на реке не проводились с конца 1980-х годов, официально судоходство на реке запрещено, в настоящее время движение судов по реке выполняется в рамках ежегодно объявляемого ЧС. Периодически проводятся локальные дноуглубительные работы, однако это происходит только по факту нарушения габаритов пути. В 2022 году было принято решение о включении реки в перечень внутренних водных путей, в связи с чем исследования ее режима становятся крайне актуальными.

Особенности русла реки и конфигурации ее долины во многом обязаны геологической истории территории. Четвертичное оледенение привело к формированию крупных подпрудных озер, вынос продуктов ледниковой эрозии привел к изменению конфигурации речной сети [Васьковский, 1962]. Результатом циклического существования и прорыва таких озер стала врезанная долина реки в нижнем течении и значительный по площади (около 7% от площади водосбора) плоский, ежегодно затапливаемый участок Марковско-Бельской низменности в среднем течении реки, представляющий собой цепочку котловин спущенного озера, заполненных лессовидными суглинками мощностью до 500 метров [Государственная..., 2009]. В пределах этого участка формируется Анадыро-Майнское разветвление, объединяющее Анадырь, его крупный приток Майн и другие притоки меньшего размера (рис. 1). В его пределах развиваются более 30 средних и малых проток, каждая относительно крупная протока представляет собой самостоятельный меандрирующий водоток с врезанными, относительно стабильными излучинами. При этом доля затапливаемой поймы аллювиального генезиса не превышает 10%, остальная часть поймы является унаследованной, представляющей собой днище бывшей озерной котловины.

Разветвленный участок начинается с отделения от русла Анадыря левобережной протоки Щучьей. Ниже по течению русла Анадыря и Майна сближаются на минимальное расстояние, здесь их соединяет протока Прорва. В зависимости от уровня воды в каждой из рек, а также во впадающей в Прорву реке Мамолиной направление течения в протоке может меняться.

Так, согласно анализу снимков, Sentinel за 2017-2021 годы в 50% случаев сток Мамолиной распределяется по Прорве в сторону обеих главных рек. В 30% случаев (при низкой водности всех рек или очень высоких уровнях Майна) наблюдается течение из Майна в Анадырь. Противоположное направление характерно для подъема уровня на Анадыре и наблюдается в 10% случаев. При синхронном росте уровня воды в Анадыре и Майне их воды «запирают» протоку с двух сторон, в результате чего происходит затопление окружающей территории.

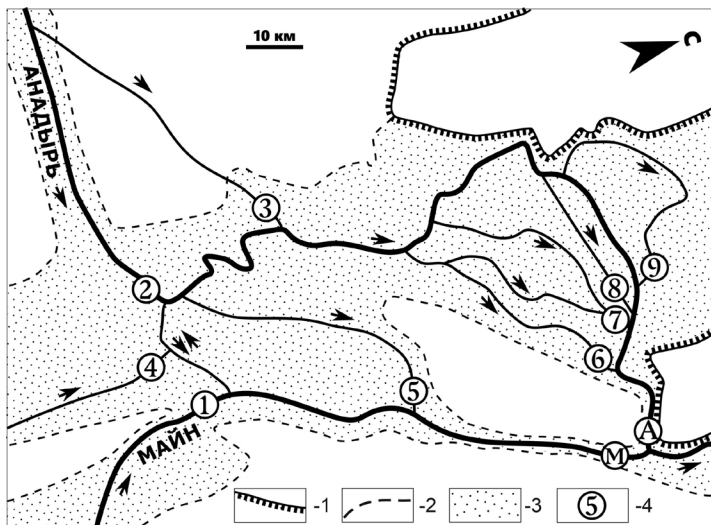


Рис. 1. Упрощенная схема Анадыро-Майнского разветвленного участка.

1 – коренные борта долины, 2 – бровки термокарстовых террас, 3 – затопляемая поверхность, 4 – условные обозначения створов измерений.

Ниже Прорвы от реки ответвляется протока Вакарева, впадающая в Майн значительно ближе к его устью. Ниже по течению Анадырь формирует макроизлучину, выпуклую (правобережную) часть, которой спрямляют три крупных протоки, формирующие многоруканную систему – Морокова, Большая Новая и Луковая с многочисленными, но маловодными перетоками между собой. Левобережный участок также занят небольшими боковыми протоками, сливающимися с притоком – рекой Крестовой.

Анадырь между устьем Прорвы и устьем Майна крайне извилист, его длина на этом участке составляет 230 км – около четверти от общей длины реки. Из-за минимальных уклонов и сужения долин коренными берегами в створе слияния с Майном формируется своеобразное «бутылочное горлышко», при подъеме уровней создающее подпор и приводящее к затоплению междуречной пойменной территории, скорости слива с которой ограничены пропускной способностью русла в замыкающем створе разветв-

ления. В результате этого, по предварительной оценке, одновременно в разветвлении может накапливаться до половины годового стока реки.

Села Марково и Ваеги, расположенные на Анадыре и Майне (соответственно) выше входных створов разветвления, регулярно страдают от наводнений из-за отсутствия пригодных мест для расположения поселений из-за большой площади разлива рек. Оба села затапливаются практически ежегодно, раз в 10-15 лет – полностью. Из-за расположения сел на поймах рек, сложенных галечным материалом, затопление усиливается за счет подъема уровня грунтовых вод. Скорости подъема уровня в Марково достигают 1,5 м/сутки, в Ваегах – до 3 м/сутки, Крупнейшие по последствиям половодья наблюдались в 1966 (М, В), 1994 (В), 1997 (М), 2006 (В), 2014, (М), 2018 (М, В) и 2021 (В) годах. Тренд на увеличение количества осадков и среднегодовых температур, наблюдаемый на территории бассейна, свидетельствует о возможном учащении затоплений в ближайшем будущем.

В пределах разветвления авторами было выполнено две серии измерений – в конце июня 2021 года на спаде половодья и в конце июля 2022 года в меженный период. Были выполнены повторные измерения расходов и мутностей воды в 50 створах в пределах системы, что позволило оценить распределение водности по протокам (табл. 1).

Таблица 1. Измеренные расходы воды по элементам Анадыро-Майнского разветвления (в долях от общего расхода в замыкающем створе) в разные фазы водного режима

Индекс на рис. 1	Водоток	Половодье 2021 ($Q_5 = 6160 \text{ м}^3/\text{с}$)	Межень 2022 ($Q_5 = 1150 \text{ м}^3/\text{с}$)
А	Анадырь, стрелка	78%	74%
М	Майн, стрелка	22%	26%
1	Майн, верхний створ	9%	31%
2	Анадырь, База Крепость	13%	35%
3	Щучья	7%	15%
4	Мамолина	6%	4%
5	Вакарева	0,4% / 5%	0,2% / 4%
6	Морокова	6% / 10,5%	6,1 % / 6,7%
7	Б.Новая	3,7% / 7,3	3,2 / 7%
8	Луковая	11% / 13%	21 / 23%
-	Анадырь, в створе пр.Луковой	13%	35%
9	Крестовая	4%	2%
-	левобережная боковая приточность	10%	9%

Можно отметить, что соотношение между расходами воды в Анадыре и Майне в замыкающем створе практически не изменяется между фазами водного режима. Доля стока в протоке Щучьей постоянна и составляет треть от стока Анадыря выше разветвления. Крупнейшая второстепенная протока в системе – Луковая – формирует с основным руслом Анадыря параллельно-рукавное разветвление, уступая ему по водности в межень и сравниваясь в половодье. В других крупных протоках доли стока от общего расхода также относительно постоянны – при этом в межень их расходы

значительно меньше, чем в основном русле Анадыря, в половодье же они практически сравниваются.

Детальные измерения в протоках, притоках и перетоках системы позволили оценить баланс воды в разветвлении и долю воды, аккумулирующейся в пойме. Так, на спаде половодья сток с затопленной территории междуречья составил 45% от общего расхода. В меженный период пойменный сток наблюдался только в одной «слепой» протоке, дренирующей замкнутый участок междуречья, и составил 10% от общего расхода воды. Аккумулирующая способность поймы приводит к повышенным скоростям накопления материала, что было подтверждено результатами точечного бурения – таким образом, повышение отметок поймы могло значительно изменить конфигурацию разветвления даже за исторический период.

Мутность воды на водотоках участка исследования сравнительно невысока. По данным наблюдений на г/п Снежное, среднегодовая мутность воды составила 45 мг/л [Яншин, 1991]. Во время полевых исследований проводился отбор и фильтрация проб на мутность, которая показала значительно меньшие значения во всех точках измерения (рис. 2).

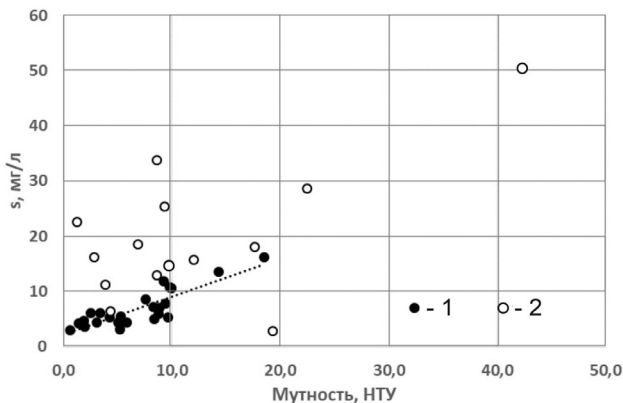


Рис. 2. Связь оптической и весовой мутности для водных объектов среднего течения Анадыря

Меженные значения мутности не превышали 16 мг/л, увеличиваясь вниз по течению. Параллельное измерение оптической мутности (NTU) с помощью турбидиметра позволило получить региональное уравнение связи, устойчивое для меженных условий:

$$S = 0.686 \text{ NTU} + 2.21.$$

В половодье связь между оптической и весовой мутностью не так однородна, что связано с большим количеством биогенных материалов в поступающей с поймы воде и цветностью воды, увеличивающейся при продолжительном стоянии воды на пойме.

Скорости размыва на крупных рукавах в среднем течении Анадыря и Майна сравнительно невелики (максимальные достигают 2,6 м/год), что

связано с продолжительным стоянием уровней при затопленной пойме, однако из-за значительной длины русел среднегодовые площади размыва достигают $0,78 \text{ км}^2$ на Анадыре и $0,12 \text{ км}^2$ – на Майне. Это соответствует приблизительно 12 млн тонн поступающего в русла материала за год, что более чем в 6 раз превышает наблюдаемый на г/п Снежное сток взвешенных наносов. Такая выраженная разница может свидетельствовать о значительном стоке влекомых наносов и высокой динамике форм донного рельефа.

На продольном профиле реки от Базы Крепость до устья (рис. 3) выделяется участок резкого увеличения уклонов, который связан с пересечением рекой тектонического подъема между хребтом Пекульней и Алганским кряжем.



Рис. 3. Продольный профиль отметок водной поверхности (пунктир) и отметок дна реки Анадырь от Базы Крепость до устья

Здесь расположены наиболее динамичные и сложные для судоходства перекатные участки, режим которых определяется значительным объемом перемещаемых влекомых наносов и регулярным перераспределением стока между протоками реки. Также по продольному профилю можно отметить значительные глубины реки (до 30 метров и более), характерные для двух участков – Анадыро-Майнского разветвления и приустьевое участка, расположенного ниже границы проникновения приливов (около 190 км от устья) и сообщаемого с руслом крупного озера Красное. На приустьевом участке подобные глубины характерны для протяженных плесовых ложбин, образовавшихся при врезании нижнего течения Анадыря в условиях последней четвертичной трансгрессии моря. В пределах же разветвленного участка глубины приурочены к отдельным, выраженным ямам. Глубины ям в 3-8 раз превышают гидравлически обоснованные глубины, соответствующие морфологии и водности русла на данном участке согласно критерию Ржаницына. Всем ямам на основном русле (их выявлено 60 штук) соответствуют округлые заливы на берегах, создающие локальные расширения русла, что позволило визуальнo идентифицировать более 50 аналогичных участков на крупнейших протоках. Сопоставление лоцманских карт и промерных работ 2021-2022 годов показывает, что положение и глубины ям практически не изменились, что с учетом показанного выше значительного объема перемещаемых на участке наносов свидетельствует о формировании гидравлических условий, препятствующих занесению ям. Генезис данных образований до конца не ясен – причиной их формирования могут быть как

водоворотные процессы или накопление пробки шуги в поперечном сечении, так и специфические криогенные процессы, возможность проявления которых в сформированном в толще подпрудно-озерных отложений русле крайне велика.

ЛИТЕРАТУРА

Васьковский А.П. Картографическая схема антропогенного оледенения на Крайнем Северо-Востоке СССР // Краеведческие записки. Вып. IV. Магадан, 1962. С. 206-208.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Чукотская серия. Лист Q-59 (Марково). Объяснительная записка / М.: ФГУГП «Георегион», 2009.

Яньшин А.В. Гидрометеорологический очерк Чукотского автономного округа. Владивосток: ДНИИМФ, 1991. 155 с.

**Эрозионные, русловые и устьевые процессы
(исследования молодых ученых университетов)**

Сборник материалов

2023

Научное издание

Подготовка оригинал-макета – С.Н. Ковалев

Подписано в печать 21.03.2023 г.
Формат 60х90/16. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Тираж 100 экз. Заказ № 2038
Отпечатано в типографии «ВАШ ФОРМАТ»
г. Москва, ул. Донская, 32
(495)749-45-84
www.kniga-premium.ru