

ПРИЛИВНАЯ ДИНАМИКА ВОД В ДЕЛЬТЕ ПЕЧОРЫ В ЛЕТНЮЮ МЕЖЕНЬ

А.М. Алабян¹, А.Н. Василенко², Н.А. Демиденко³, И.Н. Крыленко⁴,
Е.Д. Панченко⁵, А.А. Попрядухин⁶

^{1, 2, 4, 6} Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши

³ Институт океанологии имени П.П. Шишова РАН

⁵ Институт водных проблем РАН, лаборатория гидродинамики

¹ Канд. геогр. наук, доц.; e-mail: andrei_alabyan@mail.ru

² Ст. преподаватель; e-mail: saiiia24@mail.ru

³ Науч. сотр.; e-mail: demidenko_nikola@mail.ru

⁴ Канд. геогр. наук, вед. науч. сотр.; e-mail: krylenko_i@mail.ru

⁵ Мл. науч. сотр.; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

⁶ Инженер; e-mail: gidroartem@mail.ru

В августе 2020 г. состоялась гидрологическая экспедиция в устье Печоры, результаты которой позволяют коренным образом переосмыслить динамику вод в микроприливной дельте крупнейшей реки западного сектора Российской Арктики. Выявлены ранее неизвестные особенности циклических изменений гидравлических параметров водотоков дельты, вызываемые приливными колебаниями уровня моря. Неравномерное изменение уровней воды на морском крае дельты по мере продвижения приливной волны по мелководной Коровинской губе в западном направлении приводит к появлению реверсивных течений и существенному изменению распределения стока между главным руслом Печоры и основными дельтовыми рукавами. При стоковом расходе воды 1,9–2,0 тыс. м³/с и величине прилива у мыса Болванский Нос 1,0 м в устье главного русла Большой Печоры наблюдались реверсивные движения водных масс с максимальными расходами воды 4,76 тыс. м³/с на отливе и 4,11 тыс. м³/с в сторону реки на приливе. Поступления осолоненных морских вод в русло при этом зафиксировано не было. Основное перераспределение стока в дельте происходило посредством реверсивных течений в проливе Месино у д. Андег, где от Малой Печоры влево отходят рукава Тундровый Шар и Средний Шар. Распределение стока и динамика течений в этом узле в ходе приливного цикла носит исключительно сложный характер и является ключевым фактором обводнения западной части дельты Печоры. На участке от вершины дельты до с. Андег по рукаву Малая Печора проходило на 10–18% речного стока больше, чем по главному судоходному рукаву Большая Печора в зависимости от фазы приливного цикла. В правобережных рукавах Голубковский Шар и Городецкий Шар транзитный сток отсутствовал. Приливные колебания уровня и расхода воды прослеживались и у опорного гидрологического поста с. Оксина в 141 км от устьевого створа.

Ключевые слова: распределение стока, дельтовые рукава, приливный цикл, реверсивные течения, продвижение и трансформация приливной волны, Андегский узел

ВВЕДЕНИЕ

Печора – крупнейшая река западного сектора Российской Арктики. Одна из основных хозяйственных функций устья Печоры – водотранспортная, здесь расположен морской и речной порт Нарьян-Мар, который является важным транспортным узлом как Северного морского пути, так и континентальной части региона. В настоящее время при отсутствии круглогодичного автомобильного сообщения между Нарьян-Маром и Центральной Россией Печора является единственной магистралью, связывающей Ненецкий автономный округ с «материком».

Микроприливная устьевая область Печоры имеет ключевое значение для рыбного хозяйства региона как место нагула семги и других ценных пород

рыб. Мелководная Коровинская губа, принимающая воды западных рукавов дельты Печоры, имеет важнейшее природоохранное значение, здесь находится Ненецкий государственный природный заповедник. В последние десятилетия в районах Большеземельской и Малоземельской тундры, прилегающих к устью Печоры, ведется освоение нефтяных и газовых месторождений, существенно увеличивающее нагрузку на природу и инфраструктуру региона.

Река Печора впервые упоминается в новгородских летописях в связи с походом воеводы Углебы на Югру в 1032 г., а в начале XVI в. в ее устье был основан первый русский заполярный город Пустозерск [Сухогрузов, 2000]. История гидрографических работ в устье Печоры в XIX в. связана с работой экспедиции капитан-лейтенанта П.И. Кру-

зенштерна (сына знаменитого мореплавателя И.Ф. Крузенштерна) и геолога А.А. Кейзерлинга [Кейзерлинг, Крузенштерн, 1851], а в послереволюционное время – с изысканиями экспедиции инженера Б.Н. Юрьева для строительства порта в Нарьян-Маре [Юрьев, 1935].

В 1968 г. для систематического изучения гидрологического режима устьевой области Печоры была создана Печорская устьевая станция (ПУС) в составе Нарьян-Марской гидрометеорологической обсерватории Северного управления гидрометеослужбы СССР. Позднее ПУС была реорганизована в Отдел гидрологии устья Печоры в составе Объединенной гидрометеорологической станции Нарьян-Мар.

Наиболее активное изучение динамики вод в микроприливной устьевой области Печоры выполнялось ПУС под методическим руководством Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова (ГОИН) в 1970–1980-е гг. прошлого века [Лупачев, 1979; Лупачев, Скриптунов, 1979; Полонский, 1984]. Помимо научных целей эти исследования часто были ориентированы на решение ряда хозяйственных задач, наиболее известной из которых была оценка последствий изъятия стока Печоры для планировавшейся в те годы переброски в бассейн Волги.

Помимо ПУС и ГОИНа в устье Печоры работали экспедиции Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ), Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), Института океанологии им. П.П. Ширшова (ИО РАН) и др., результаты которых обобщены в монографиях [Михайлов, 1997; Печорское море..., 2003; Эстуарно-дельтовые системы..., 2007].

Измерения расходов воды в рукавах дельты Печоры и прочие гидрометрические работы в прошлом веке проводились с использованием методик, предусматривающих постановку судна на якорь на скоростных вертикалях и измерение скоростей течения по горизонтам гидрометрическими вертушками, фиксирующими направление течения [Наставление..., 1968]. При таком порядке выполнения работ измерение расхода воды в крупном рукаве обычно занимало весь рабочий день, что затрудняло исследование нестационарности течений в многорукавной приливной дельте. Оценка влияния приливов на распределение стока была возможна лишь косвенными методами [Полонский, 1987].

В начале XXI в. в практической гидрометрии приливных устьев произошла «революция», связанная с возможностью измерения расходов воды и скоростного поля потока акустик-доплеровскими профилографами [Sepulveda et al., 2006; Vennel, 2006]. Многократное сокращение времени и трудозатрат при измерении нестационарных водных потоков

дало возможность существенно расширить спектр изучаемых гидродинамических процессов в приливных устьях рек, находящихся в различных областях Мирового океана [Losada et al., 2007; Lu et al., 2015; Rollnic, Rosario, 2015; Hoitink, Jay, 2016; Abreu et al., 2020].

С 2011 г. акустик-доплеровские профилографы течений стали применяться и для гидрометрических работ в устье Печоры [Полонский, 2012; Балакина и др., 2013; Борщенко и др., 2020]. Была продемонстрирована их высокая эффективность, однако сделать точные количественные оценки диапазонов приливных колебаний стока в рукавах удавалось далеко не всегда, особенно в межень, когда влияние приливов на перераспределение стока между рукавами дельты происходит наиболее интенсивно.

С целью получения новых, более подробных данных о приливной динамике вод в рукавах дельты Печоры в августе 2020 г. состоялась экспедиция сотрудников кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ с участием научного сотрудника ИО РАН Н.А. Демиденко, имевшего опыт работ в устье Печоры с 1980-х гг. Задачами экспедиции было измерение расходов воды и скоростного поля потока в основных рукавах дельты в течение приливного цикла с непрерывной фиксацией колебаний уровня воды вдоль морского края дельты, в ее вершине и в ключевых узлах распределения стока. Экспедиция была спланирована с учетом опыта работы в приливных устьях крупных рек бассейна Белого моря и использовала отработанные там методики полевых измерений [Алабян и др., 2016, 2018].

Устьевая область Печоры еще с конца прошлого века считалась интересным объектом для математического моделирования [Урнышев, 1988], однако ни одной реально работающей гидродинамической модели, откалиброванной и верифицированной на материалах детальных полевых исследований и пригодной к практическому применению, к настоящему времени не создано. Поэтому задачей экспедиции было получение натурных данных для разработки, калибровки и верификации такой модели на основе опыта моделирования приливных устьев рек Беломорского бассейна [Панченко и др., 2020; Alabyan, Lebedeva, 2018]. Помимо решения научных задач, связанных с изучением динамического взаимодействия речных и морских вод в условиях многорукавной приливной дельты, гидродинамическое моделирование может найти практическое применение при расчете транспорта загрязнителей в водотоках дельты Печоры, планировании мероприятий по улучшению навигационных условий и защите от наводнений.

Гидрография и водный режим низовьев Печоры. Впадая в юго-восточную часть Баренцева моря, называемую Печорским морем, Печора формирует ми-

кроприливное устье с дельтой выполнения и закрытым отмелым устьевым взморьем [Михайлов, 2004; Эстуарно-дельтовые системы..., 2007]. Ее устьевая область включает в себя устьевое взморье (Печорскую губу) и устьевой участок реки протяженностью около 190 км до д. Великовисочное. Отсчет ведется от створа в устье главного рукава Большой Печоры на параллели мыса Болванский Нос (рис. 1). Морской границей устьевой области считается линия, проходящая через полуостров Русский Заворот, цепь Гуляевских Кошек и о. Песяков к о. Варандей.

В 141 км от устьевое створа находится опорный гидрологический пост с. Оксина, а в 22 км

ниже него у д. Большая Сопка – вершина дельты, где русло реки разделяется на два основных рукава – Большую и Малую Печору. В рукавах дельты расположены уреченные посты: д. Осколково (53 км от устьевое створа), д. Андег (75 км) и г. Нарьян-Мар (101 км). Пост в Нарьян-Маре оборудован самописцем, а в Оксине, Осколково и Андеге уровень воды регистрируется наблюдателем дважды в сутки. Наблюдение за уровнем моря ведется на морских постах Ходовариха на п-ове Русский Заворот, Варандей и Константиновский. Средний уровень моря (Печорской губы) имеет отметку $-0,36$ м БС.

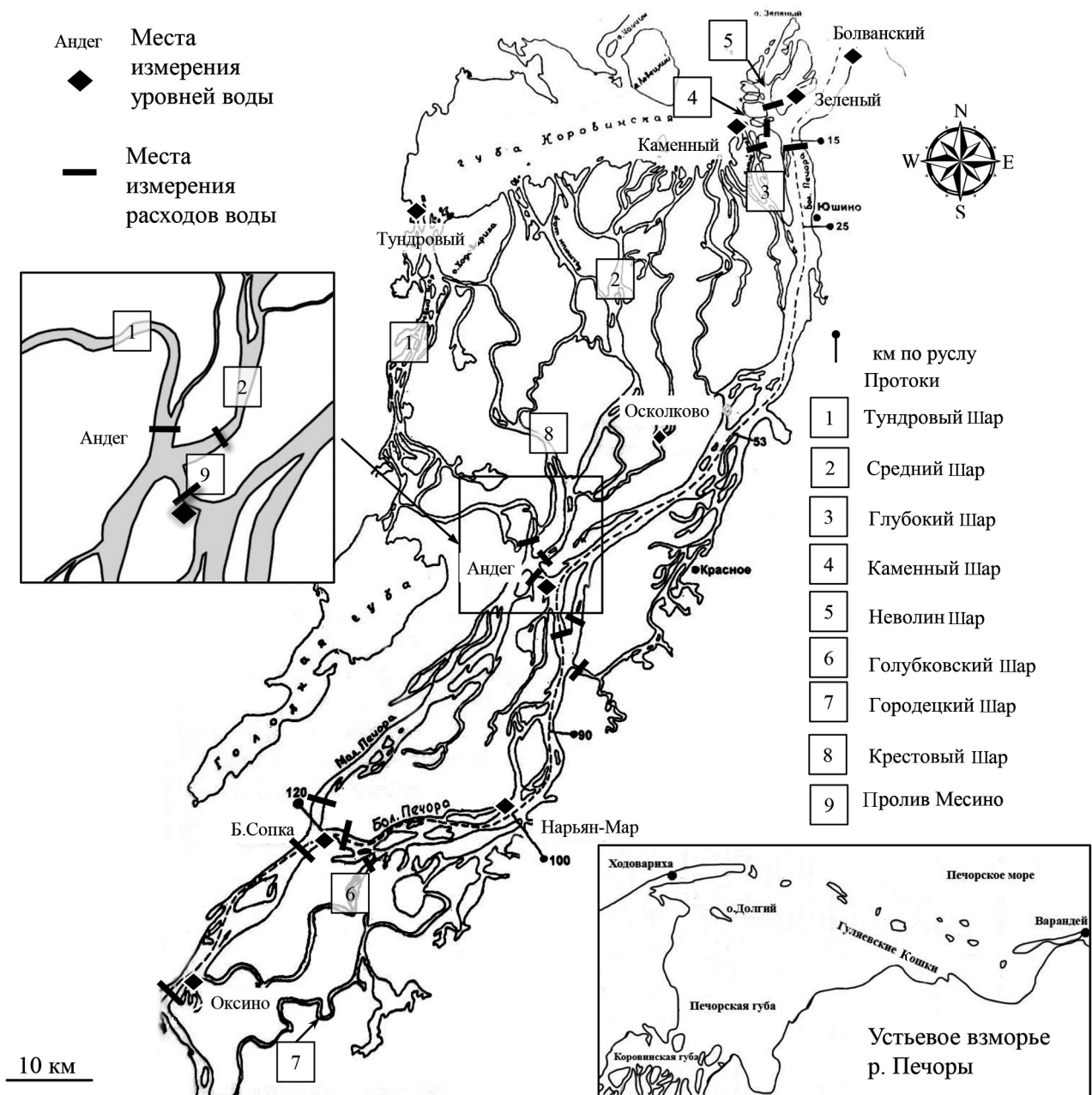


Рис. 1. Схема дельты Печоры и полевых работ 14–25 августа 2020 г.

Fig. 1. Scheme of the Pechora delta and field work of 14–25.08.2020

Площадь бассейна Печоры составляет около 324 тыс. км², длина реки – 1810 км [Ресурсы..., 1972]. Средний многолетний расход воды (норма стока) у с. Оксина за 1932–2020 гг. составляет 4800 м³/с, что соответствует годовому объему стока 151 км³. Максимальный расход воды в вершине дельты наблюдался 15.05.1991 и составил 39 200 м³/с. Средний минимальный расход летней межени около 2500 м³/с, минимальный наблюденный был зарегистрирован 13.08.2013 и составил 1500 м³/с; средний минимальный расход зимней межени – около 500 м³/с, при абсолютном минимуме 388 м³/с, наблюдавшемся 16–18 апреля 1986.

Режим уровней в вершине устьевой области Печоры формируется главным образом под влиянием стока воды, поступающего из ее бассейна. Пик весеннего половодья наблюдается обычно в конце мая. Стоковые подъемы уровня усугубляются ледовыми заторами и достигают 8–9 м в вершине устьевой области и около 5 м в районе Нарьян-Мара. Подъем

уровня воды ниже Нарьян-Мара уменьшается из-за расплывания волны половодья и почти не сказывается на уровне воды в Печорской губе [Эстуарно-дельтовые системы..., 2007].

Распределение стока по рукавам дельты. Согласно измерениям и расчетам В.Ф. Полонского [1984] для ситуации 1977–1980 гг. (табл. 1), в створе с. Оксина более 95% стока концентрировалось в основном русле Печоры. В правобережные протоки Голубковский Шар и Городецкий Шар (Шар – местное название рукавов Печоры) даже в половодье и в дождевые паводки попадала лишь незначительная часть стока. В вершине дельты в правый рукав Большой Печоры, по которому проходит основной судоводный ход, в половодье поступало около 43% общего расхода воды, а в левый, Малую Печору, – около 49%; в межень доля стока Большой Печоры могла уменьшаться до 46%, а Малой Печоры, соответственно, увеличиваться до 54%.

Таблица 1

Распределение стока воды по рукавам дельты Печоры по данным предыдущих исследований, %

Источник	[Полонский, 1984]	[Полонский, 2012]	[Борщенко и др., 2020]
Период измерений	1977–1980	11–13.09.2011	2018–2019
Расход в вершине дельты, тыс. м ³ /с	Половодье	1,9	10–11
Рукав дельты, створ			
<i>Вершина дельты Печоры</i>			
р. Печора, Оксина	95,5	>99	(87,8)
Голубковский Шар, исток	4,2	<1	(12,2)
Городецкий Шар, г. Нарьян-Мар	4,5	0	
р. Печора, Большая Сопка	91,3	(100)	(87,8)
Малая Печора, Большая Сопка	48,6	55	50,7
Большая Печора, Большая Сопка	42,7	45	37,1
Андегский узел			
Малая Печора, Большая Сопка	48,6	45	50,7
Утчер (Тундровый Шар), исток	5,5	?	7,7
Крестовый Шар, исток	1,2	?	1,3
Средний Шар, исток	17,5	?	18,9
Месин, Месино	24,4	?	22,8
<i>Низовья Большой Печоры</i>			
Глубокий Шар, исток	4,2	–	–
Каменный Шар, исток	1,2	–	–
Неволин Шар, исток	4,9	–	–
Большая Печора, устье	64,9	–	–

Примечание: «–» означает отсутствие измерений, «?» – измеренные значения автором не приведены, в скобках указаны значения, не приведенные непосредственно автором, а рассчитанные на основе его данных.

Дальнейшее перераспределение расходов воды Малой Печоры отделяются дельтовые рукава Тундровый Шар (Утчер-Шар) и Средний Шар, от ко-

торого, в свою очередь, отделяется Крестовый Шар (см. рис. 1, врезка). При этом основной поток Малой Печоры резко поворачивает вправо в поперечную протоку с местным названием пролив Месино и соединяется с потоком Большой Печоры. В половодье сток в Андегском узле распределяется в следующем соотношении: 5,5% – Тундровый Шар; 1,6% – Крестовый Шар; 17,5% – Средний Шар; 24,4% – пролив Месино. В межень распределение стока было оценено следующим образом: 3,6% – Тундровый Шар; 0,6% – Крестовый Шар; 25% – Средний Шар; 25% – пролив Месино.

Более поздние измерения, выполненные в различные фазы водного режима акустик-доплеровскими профилографами [Полонский, 2012; Борщенко и др., 2020], показали, что кардинальных изменений в распределении стока по рукавам дельты в половодье за последние 40 лет не произошло (см. табл. 1).

Уровенный режим. Уровень моря в Печорской губе мало зависит от стока Печоры и определяется влиянием морских факторов и ветровыми условиями. В Печорскую губу приливная волна проникает из моря через проливы между островами Гуляевские Кошки (см. рис. 1, врезка), генеральное направление приливных течений в Печорской губе – юго-западное, а отливных – северо-восточное [Лупачев, Скриптунов, 1979]. Приливы имеют неправильный полусуточный характер [Гидрометеорология..., 1990], *высота приливной волны, приходящей дважды в течение суток, разная – чередуются «большая» и «малая» полная вода.* Это обстоятельство в дальнейшем будет иметь ключевое значение при анализе методики и результатов измерения стока в водотоках дельты. Величина «большой» волны прилива составляет 1,0–1,1 м в сизигию и 0,5 м в квадратуру. Помимо периодических приливных колебаний существенную роль играют непериодические сгонно-нагонные колебания уровня моря, происходящие в синоптическом масштабе времени и связанные с прохождением крупных атмосферных вихрей.

Уровенный режим водотоков дельты Печоры обусловлен как изменчивостью сезонного стока воды, так и воздействием приливов и нагонов со стороны моря. Среднее многолетнее превышение уровня воды у Нарьян-Мара над уровнем Печорской губы, соответствующее среднегодовому значению расхода воды в вершине дельты, составляет 75 см, что соизмеримо с величиной прилива в устьевом створе и соответствует уклону 7,5 мм/км. Максимальный уклон в половодье может достигать 3,5 см/км, в то время как минимальное падение среднего уровня в межень составляет около 2 мм/км [Эстуарно-дельтовые системы..., 2007]. Такое соотношение уклона и величины приливных и сгонно-нагонных коле-

баний уровня моря в сочетании с особенностями распространения приливной волны на взморье обуславливает чрезвычайно сложный характер динамики вод в дельте Печоры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика гидрометрических работ в приливных устьях, основанная на измерениях расходов воды в течение полного приливного цикла акустик-доплеровскими профилографами с одновременной регистрацией колебания уровня воды в ключевых узлах устьевой области, была разработана и успешно применена на реках Беломорского бассейна [Алабян и др., 2016, 2018; Мискевич и др., 2018]. Наибольшую эффективность данная методика демонстрирует в комплексе с гидродинамическим моделированием, когда результаты полевых измерений используются для калибровки и верификации модели. Последняя, в свою очередь, увязывает отдельные временные срезы, охваченные измерениями, в континуальную картину динамики вод в многорукавном приливном устье [Панченко и др., 2020; Lu et al., 2013; Alabyan, Lebedeva, 2018; Abreu et al., 2020].

Экспедиция в устье Печоры была проведена летом 2020 г., непосредственно полевые работы выполнялись в период с 14 по 25 августа. Гидрометрические измерения производились при речном стоке, близком к минимальному летнему, амплитуда приливных колебаний уровня моря уменьшалась от сизигии к квадратуре на фоне постепенного снижения уровня после нагона 17 августа (рис. 2).

Для регистрации приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня воды на различных участках устьевой области устанавливались цифровые барометрические самописцы (логгеры) Keller DCX-22 и Solinst Levellogger LT F15/M5, запрограммированные на запись данных с интервалом одна минута. Один из логгеров оставался на базе экспедиции и регистрировал изменение атмосферного давления для введения поправок в записи самописцев, находящихся в воде.

Распространение приливной волны вдоль морского края дельты по Коровинской губе отслеживалось тремя логгерами (см. рис. 1) – «Болванский» (у мыса Болванский Нос в устье главного русла), «Каменный» (у выхода протоки Каменный Шар) и «Тундровый» (у выхода рукава Тундровый Шар). Еще пять логгеров были равномерно распределены вдоль основного рукава Большой Печоры: «Зеленый» на о-ве Зеленый у самого нижнего разветвления основного русла Большой Печоры; «Осколково» и «Андег» у деревень с уровенными постами; «Сопка» у деревни Большая Сопка в вершине дельты и «Оксино» у опорного гидрологического поста.

Высотные отметки «нулей» логгеров определялись с использованием системы дифференциального спутникового позиционирования, состоящей из приемников Javad Triumph-VS, Javad Triumph-1 и EFT M4, с постобработкой в программе Justin. Данные всех логгеров были приведены к единой системе высот, используемой на гидрологическом посту г. Нарьян-Мар.

Измерения расходов воды и скоростного поля потока выполнялись акустическим доплеровским профилографом RiverRay Teledyne RD-Instruments, закрепленным под бортом надувной моторной лод-

ки Фаворит-470. Расчет расходов воды и средней скорости течения выполнялся непосредственно в ходе измерений с использованием программы WinRiver II. Время прохода по створу в зависимости от ширины рукава варьировало от нескольких минут до получаса. В идеальном случае продолжительность каждой серии измерений должна была соответствовать продолжительности полусуточного приливного цикла, однако в реальных условиях она определялась временем наступления экстремумов или стабилизации значений расходов воды и составляла 7,5–11,5 часов.

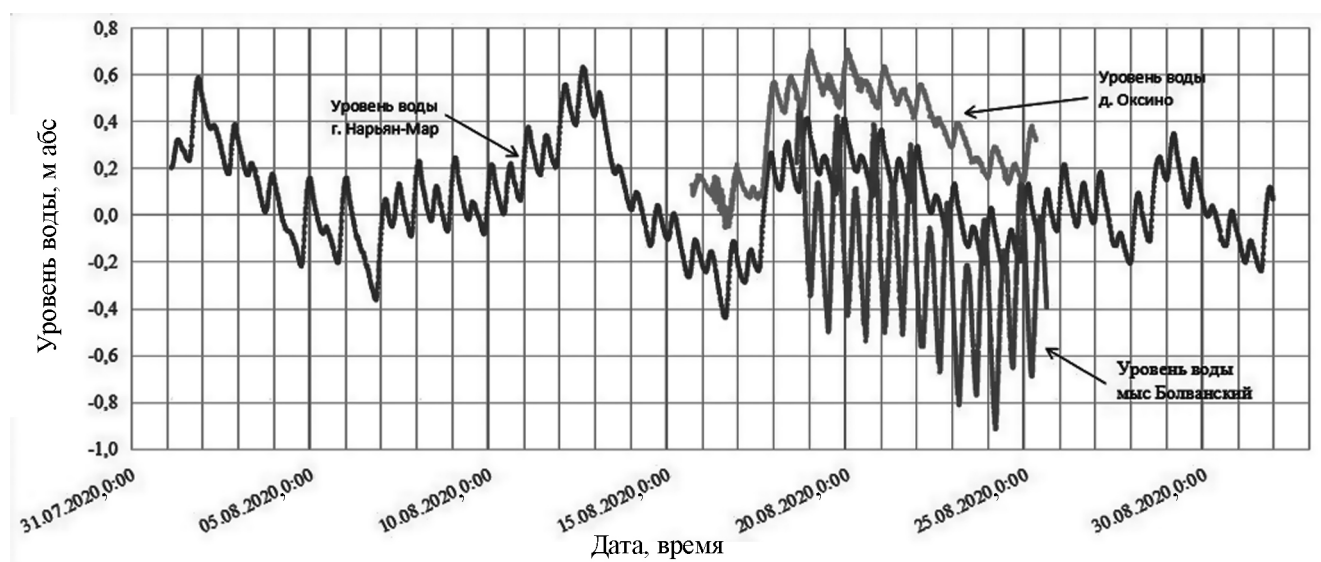


Рис. 2. Ход уровней воды в устьевой области Печоры в августе 2020 г.

Fig. 2. Water level oscillation in the Pechora estuarine area in August 2020

При выполнении гидрометрических измерений периодически (главным образом при работе у морского края дельты в прилив) выполнялось измерение электропроводности воды по всей ее толще зондом YSI, однако проникновения осолоненных вод в рукава дельты зафиксировано не было.

Сопоставление результатов измерений августа 2020 г. с предшествующими измерениями, выполненными в сентябре 2011 г. [Полонский, 2012] при сопоставимой водности реки, производилось исходя из моментов наступления экстремумов уровня по самописцу поста г. Нарьян-Мар.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ изменения уровней воды по логгерам позволил получить представление о темпах и характере распространения приливной волны вдоль морского края дельты и вверх по главному руслу Печоры. Ввиду относительно медленной трансформации волны ее фазовая скорость при расчете по продвижению гребня (максимум уровня) и фронта

(начало прилива) оказалась практически одинаковой (табл. 2, здесь и далее приводятся данные для «большой» приливной волны). Наибольшие различия наблюдаются на участках наибольшей трансформации волны — непосредственно после захода в русло Большой Печоры со взморья и на перекатном участке Большой Печоры выше г. Нарьян-Мара. Для этих же участков характерна наименьшая скорость распространения волны — 13–16 км/ч, при том что на остальных участках русла она составляет 20–22 км/ч.

К устью Тундрового Шара приливная волна приходит спустя 4,5 часа после захода в основной рукав дельты, где она за это время успевает распространиться на 90–95 км. Таким образом, скорость ее продвижения в западном направлении по мелководной Коровинской губе можно оценить в 12–13 км/ч, при этом высота волны уменьшается более чем в два раза.

Тот факт, что приливные колебания уровня воды отчетливо фиксируются у с. Оксина (рис. 3А), подтверждает правильность тезиса, что вершина дельты не является верхней границей устьевой области

Печоры. Однако ввиду этого к результатам расчета параметров меженного стока Печоры по посту с. Оксина необходимо относиться с некоторой осторожностью. Наши измерения расхода, выполненные 17.08.2020, показали, что его значения в этом створе сильно зависят от фазы приливного цикла: через 3 часа после прихода «большой» приливной

волны и роста уровня на 17 см расход воды уменьшился почти вдвое – с 1960 до 1100 м³/с. При этом в правобережных второстепенных рукавах Голубковский Шар и Городецкий Шар транзитный сток отсутствовал, течения в них носили исключительно реверсивный характер и инициировались колебаниями уровня воды на их выходе в Большую Печору.

Таблица 2

Характеристики продвижения и трансформации приливной волны в основном русле Печоры

Участок реки (от логгера до логгера)	Длина, км	Средняя высота волны, м		Время роста уровня, ч		Время добегания, ч			Скорость	
		Начальная	Конечная	Начало	Конец	Гребень волны	Фронт волны	Среднее	км/ч	м/с
Болванский – Осколково	48	0,90	0,42	5,7	5,5	2,5	3,33	3,0	16,0	4,4
Осколково – Андег	23	0,42	0,39	5,5	5,5	1,0	1,25	1,1	20,9	5,8
Андег – Нарьян-Мар	27	0,39	0,32	5,5	5,5	1,25	1,25	1,25	21,6	6,0
Нарьян-Мар – Сопка	20	0,32	0,30	5,0	5,0	1,25	1,75	1,5	13,3	3,7
Сопка – Оксина	22	0,30	0,23	5,0	5,0	1,0	1,0	1,0	22,0	6,1

Таким образом, вывод В.Ф. Полонского [2012, с. 24] о том, что у поста с. Оксина «в меженных условиях в любой период приливного цикла при отсутствии значительных сгонно-нагонных явлений наблюдается расход воды, весьма близкий к стоковому расходу» нельзя признать обоснованным, так как его измерения 11 сентября 2011 г. выполнялись слишком короткими сериями и только на спаде «малой» приливной волны (см. рис. 3А).

В вершине дельты у д. Большая Сопка (120 км) изменение расхода воды в течение приливного цикла было еще более заметно, диапазон колебания общего расхода воды 17 августа 2020 г. составил 1195–2280 м³/с, изменяясь в противофазе с приливными колебаниями уровня воды, которые составили при этом 14 см (см. рис. 3Б). Соотношение расходов Большой и Малой Печоры в ходе приливного цикла менялось незначительно: при максимальных значениях на отливе оно составляло 45:55% в пользу Малой Печоры, а при минимальных на приливе – 41:59%. Это в целом согласуется с оценками В.Ф. Полонского [1984, 2012] и подтверждает, что кардинальной перестройки разветвленного русла на участке от Большой Сопки до д. Андег за последние 40 лет не произошло. Вместе с тем, также как и для вышележащего участка, вывод о стабильности расходов в рукавах Большая и Малая Печора в течение приливного цикла не подтвердился – 12 сен-

тября 2011 г. «большая» приливная волна к месту измерения просто еще не успела подойти.

В Андегском узле (73 км) в ходе приливного цикла была зарегистрирована наиболее сложная картина перераспределения стока с попеременным развитием обратных течений в дельтовых рукавах. Она обусловливается различными темпами продвижения и трансформации приливной волны (см. рис. 3Б) от мыса Болванский Нос по главному руслу Большой Печоры к д. Андег и по Коровинской губе к выходу Среднего и Тундрового Шара (см. рис. 3В).

Основное изменение стока происходит в проливе Месино, по которому основной поток Малой Печоры проходит в главное русло Большой Печоры. Ввиду того что в русле Большой Печоры на участке от устья до д. Андег периодически наблюдается смена прямого уклона водной поверхности (в сторону моря) на обратный (в сторону реки), основной поток главного рукава дельты имеет реверсивный характер (см. рис. 3Г). Максимальное значение приливного расхода в русле Большой Печоры достигало 4110 м³/с в створе, расположенном в 16 км от устья. При этом максимум отливного расхода составил 4760 м³/с при стоковом расходе порядка 2000 м³/с.

В Андегском узле часть приливного расхода устремлялась из Большой Печоры в Месино, достигая максимального значения примерно за один

час до наступления максимального уровня воды в Андеге (см. рис. 3В). В это время течение в рукавах Тундровый Шар и Средний Шар направлено в сторону моря. Уровни у Андега и в западной части Корвинской губы изменяются с близкой амплитудой и почти синфазно с запаздыванием в устье Тундрового Шара по отношению к Андегу на 1,0–1,5 часа. В малую воду это приводит к появлению в Тундровом Шаре небольшого обратного уклона и слабого

обратного течения ($39 \text{ м}^3/\text{с}$). С приходом «большой» приливной волны в Андег раньше, чем в устье Тундрового Шара, в нем восстановился прямой уклон, и течение развернулось в сторону моря. Максимальный отливный расход там составил $98 \text{ м}^3/\text{с}$. В Среднем Шаре во время измерений 24–25 августа 2020 г. течение происходило только в сторону моря с изменением расхода в диапазоне $270\text{--}590 \text{ м}^3/\text{с}$ в противофазе с расходом в Месино.

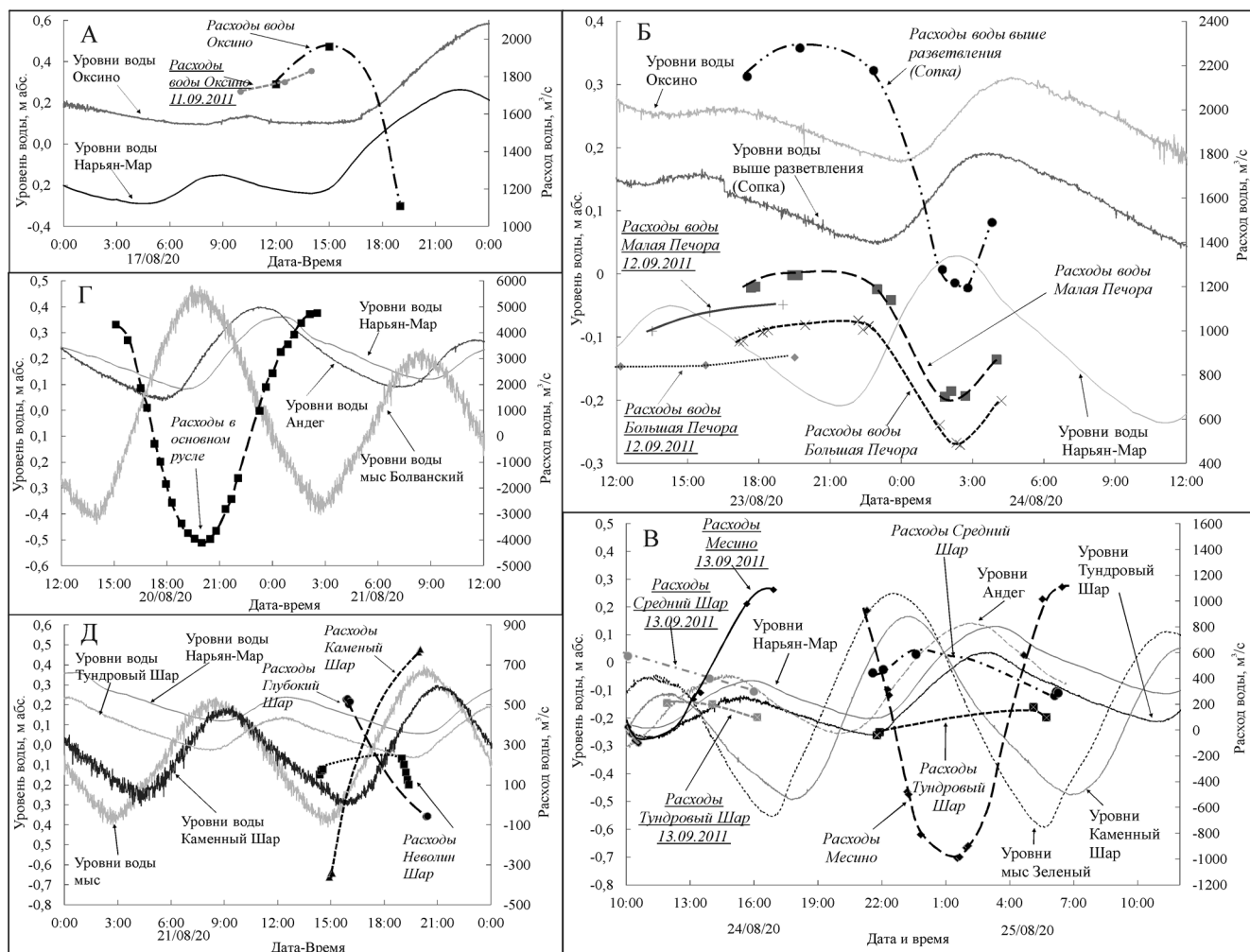


Рис. 3. Ход уровней и расходов воды: А – у с. Оксино, 17.08.2020; Б – в вершине дельты, 23–24.08.2020; В – в Андегском узле разветвления, 24–25.08.2020; Г – в основном русле Печоры в 16 км выше устьевого створа, 20–21.08.2020; Д – в устьевом разветвлении Большой Печоры у о-ва Зеленый, 21.08.2020

Fig. 3. Water table and discharge changes: А – near Oksino settlement, 17.08.2020; Б – at the Pechora delta apex, 23–24.08.2020; В – in the Andeg node, 24–25.08.2020; Г – in the Pechora River main channel 16 km from the mouth, 20–21.08.2020; Д – at the bifurcation near the Zelyonyi Island, 21.08.2020

Сопоставление результатов измерений в Андегском узле 24–25 августа 2020 г. с измерениями 13 сентября 2011 г. [Полонский, 2012] показывает, что выбор оптимального времени и продолжительности серии имеет решающее значение для понимания сути гидродинамических процессов, происходящих в сложной приливной дельте. Измерения 2011 г. выполнялись только при прохождении «малой» при-

ливной волны, причем в основном в ходе ее спада. Однако, даже такие результаты позволили сделать ряд справедливых выводов относительно сложной циркуляции потоков в Андегском узле, вызванной особенностями распространения приливной волны в основном русле Печоры и в Корвинской губе.

При измерении в «малую» приливную волну в 2011 г. обратное течение в протоке Месино, име-

ющее ключевое значение для распределения стока в Андегском узле, наблюдалось менее одного часа при максимальном расходе менее $100 \text{ м}^3/\text{с}$. В 2020 г. при измерении в «большую» приливную волну обратное течение происходило более 4,5 часов при максимальном расходе $992 \text{ м}^3/\text{с}$, который был вполне сопоставим с максимальным расходом отливного течения $1110 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, в рукава западной части дельты Печоры водные массы поступают как с вышележащего участка Малой Печоры, так и из низовьев Большой Печоры в сопоставимом количестве.

Кроме того, измерения 2020 г. опровергают утверждение, что «в течение всего приливо-отливного цикла сохраняются положительные уклоны водной поверхности и односторонние течения в западных рукавах дельты» [Полонский, 2012, с. 27]. Было показано, что в результате реверсивного течения в Тундровом Шаре его водные массы могут попадать в центральную часть дельты через Средний Шар.

Таким образом, в нижней части дельты Печоры в межень возможно условно «круговое» перемещение некоторого объема водной массы: в прилив из низовьев Большой Печоры в Средний и Тундровый Шар, и по ним вновь в сторону моря при реверсивном характере перемещения на отдельных участках дельты. Такой эффект не только интересен с чисто научной точки зрения, но и важен при исследовании возможных путей миграции загрязнителей, переносимых водным потоком. Исследование траекторий их перемещения возможно посредством полевых наблюдений с использованием трассеров или же методом гидродинамического моделирования.

Аналогичная ситуация приливного перераспределения стока наблюдается в устьевом разветвлении главного русла Большой Печоры у о-ва Зеленый (см. рис. 3Д), его причиной также является запаздывание наступления экстремумов уровня воды в Коровинской губе по сравнению с основным руслом. При сопоставимой амплитуде приливных колебаний уровня у мыса Болванский Нос и на выходе из протоки Каменный Шар в ней также происходит реверсивное движение водных масс в противофазе с реверсивным течением в основном русле Большой Печоры. Когда в Большой Печоре отливный расход нарастает с падением уровня, в Каменном Шаре наблюдается обратная ситуация. В малую воду перед началом прилива у мыса Болванский Нос уровень воды у о-ва Зеленый оказывается ниже, чем в Коровинской губе, и вода вытекает из нее в основное русло через Каменный Шар с расходом $361 \text{ м}^3/\text{с}$. По мере выравнивания уровней течение останавливается и нарастает до $777 \text{ м}^3/\text{с}$ при опережающем и более интенсивном развитии прилива в главном русле по сравнению с Коровинской губой.

Характер реверсивного течения в рукаве Глубокий Шар, отделяющемся от Большой Печоры в 25 км выше ее устьевого створа, в целом повторяет характер течения в основном русле, однако приливные течения там слабые. В протоке Неволин Шар, занимающей у о. Зеленый среднее положение, обратного течения зафиксировано не было, хотя изменения расхода воды во время приливного подъема уровня воды происходили значительно и быстро: за 25 минут он уменьшился с 232 до $102 \text{ м}^3/\text{с}$, что отражает локальные особенности строения отмелого устьевого взморья на выходе из рукава.

Таким образом, схема течений в устьевом разветвлении Большой Печоры оказывается аналогичной ситуации в Андегском узле: от мощного приливного потока, проходящего по главному водотоку, отделяется часть водной массы, поступающая в Коровинскую губу по максимально западной траектории из-за наибольшего перепада уровня в том направлении. При этом в среднем рукаве разветвления течение изменяется во времени весьма существенно, но не меняет направления в ходе приливного цикла.

ВЫВОДЫ

На основе современной комплексной методики гидрометрических работ в приливных устьях, базирующейся на непрерывных измерениях расходов воды и отметок водной поверхности в течение приливного цикла в ключевых створах дельты, получены новые сведения о динамике вод в дельте р. Печоры в летнюю межень:

1. Приливные колебания уровня воды и изменения расхода воды, связанные с приливным циклом, зарегистрированы в вершине дельты у опорного гидрологического поста с. Оксина, что говорит о нерепрезентативности данного створа как замыкающего для измерения стока со всего бассейна р. Печоры в период летней межени. Для корректной оценки минимального стока Печоры необходимо проработать вопрос о переносе опорного поста выше по течению, либо о разработке специальной методики измерения расхода воды у поста с. Оксина, включая оборудование его самописцем уровня.

2. Подтверждено, что в вершине дельты Печоры доля стока, поступающего в рукав Малая Печора во все фазы водного режима, больше, чем в основной судоходный рукав Большая Печора. Изменение соотношения стока между рукавами в течение приливного цикла незначительно, однако величины расхода воды при прохождении «большой» приливной волны в обоих рукавах уменьшаются почти в два раза. Это может существенно сказываться на механизме транспорта наносов, их отложении в прилив на перекатах и ухудшении судоходных условий.

3. Скорость распространения приливной волны вдоль морского края дельты в Коровинской губе меньше скорости ее продвижения вверх по основному руслу Большой Печоры. Это является причиной возникновения в водотоках дельты как прямых, так и обратных уклонов в различные фазы приливного цикла, что приводит к формированию сложной системы циркуляционных и реверсивных течений, которые могут оказаться причиной «неочевидной» миграции загрязнителей в водотоках дельты.

4. В низовьях основного рукава Большой Печоры при стоковом расходе порядка 2 тыс. м³/с было зафиксировано максимальное значение приливного расхода воды 4110 м³/с и максимального расхода на отливе 4760 м³/с. Значительное превышение приливного расхода над стоковым в низовьях Большой Печоры способствует обводнению западной части дельты через Андегский узел.

5. Инструментально зафиксирован реверсивный характер течения у д. Андег в проливе Месино с максимальным расходом на приливе 992 м³/с (в сторону Малой Печоры) и на отливе с расходом до 1100 м³/с (в сторону Большой Печоры). При этом незначительные реверсивные движения воды в Тун-

дровом Шаре происходили в противофазе течению в Месино, а обратных течений в Среднем Шаре не наблюдалось.

6. В нижнем разветвлении основного русла Большой Печоры течение в протоке Каменный Шар носит реверсивный характер, находясь в противофазе с течением в основном русле. Течение в Глубоковском Шаре также носит реверсивный характер, но синфазно течению в основном русле. Обратных течений в протоке Неволин Шар, занимающей промежуточное положение между основным руслом и протокой Каменный Шар, зафиксировано не было.

Полученные в ходе экспедиции данные планируется использовать при построении, калибровке и верификации гидродинамической модели дельты Печоры. Она будет ориентирована на изучение как типичных, так и экстремальных гидрологических ситуаций, связанных с изменением стока реки и уровня моря, как это было сделано для устьевых областей Северной Двины и Онеги [Панченко и др., 2020]. Практическое использование модели предполагается для расчета переноса загрязнителей, планирования навигации и мониторинга опасных гидрологических явлений.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-05-60021 «Сток рек и изменение водного и ледотермического режима устьевых областей и морских побережий Российской Арктики в XXI веке». Авторы благодарят участника экспедиции инженера С.В. Платонова, начальника объединенной гидрометстанции Нарьян-Мар Северного УГМС Л.Ю. Севастьянову и весь ее коллектив, сотрудников АО «Росморпорт» А.Ю. Богунова и С.И. Чупрова, а также хозяина турбазы Ханавей-Ся Ф.А. Личутину за неоценимую помощь в выполнении полевых работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алабян А.М., Алексеева А.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попядухин А.А., Фингерт Е.А., Демиденко Н.А., Лебедева С.В. Опыт и проблемы гидрологических изысканий в приливных устьях // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Двенадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. М.: Геомаркетинг, 2016. С. 260–263.
- Алабян А.М., Панченко Е.Д., Алексеева А.А. Особенности динамики вод в приливных устьях малых рек бассейна Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 4. С. 39–48.
- Балакина О.Н., Волик В.А., Дуркина Л.М., Полонский В.Ф. Состояние наблюдений и работ в устьевой области Печоры // Труды ГОИН. 2013. Вып. 214. С. 96–107.
- Борищенко Е.В., Мишин Д.В., Горелиц О.В. Комплексные исследования гидрологического режима устьевой области реки Печора // От познания к мировоззрению. Сборник докладов Международной научной конференции памяти Ю.Б. Виноградова. Санкт-Петербургский государственный университет. СПб.: Издательство ВВМ, 2020. С. 1054–1059.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1, Баренцево море. Вып. 1, Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 280 с.
- Кейзерлинг А., Крузеништерн П. Печорский край в географическом и гидрографическом отношениях. Из путевых наблюдений // Журн. Мин-ва внутр. дел. 1851. № 6. С. 421–455; № 8. С. 71–101, 235–251; № 9. С. 361–392.
- Луначев Ю.В. Гидрологические условия устьевой области Печоры и их возможные изменения при изъятии части стока из бассейна // Труды ГОИН. 1979. Вып. 143. С. 49–68.
- Луначев Ю.В., Скриптунов Н.А. Течения и водообмен в Печорской губе // Труды ГОИН. 1979. Вып. 143. С. 83–101.
- Мискевич И.В., Алабян А.М., Коробов В.Б., Демиденко Н.А., Попядухин А.А. Исследования короткопериодной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик устья реки Кянда в Онежском заливе Белого моря (28 июля – 15 августа 2016 г.) // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 369–373. DOI: 10.7868/S0030157418030036.
- Мискевич И.В., Коробов В.Б., Алабян А.М. Специфика инженерно-экологических изысканий в приливных устьях малых рек западного сектора российской Арктики // Инженерные изыскания. 2018. Т. 12. № 3–4. С. 50–61.

- Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
- Михайлов В.Н. Принципы типизации и районирования устьевых областей рек (аналитический обзор) // Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 1. С. 5–14.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Л.: Гидрометеиздат, 1968. Вып. 9. Ч. 1. С. 271–274.
- Панченко Е.Д., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Лебедева С.В. Моделирование гидродинамических процессов в устьях рек Онеги и Северной Двины при различных сценариях климатических изменений // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование: MARESEDU – 2020». Тверь: ПолиПРЕСС, 2020. Т. 2. С. 72–75.
- Печорское море. Системные исследования (гидрофизика, гидрология, оптика, биология, химия, геология, экология, социальноэкономические проблемы). М.: МОРЕ, 2003. 502 с.
- Полонский В.Ф. Распределение стока воды в устьевой области Печоры и тенденция его изменения // Труды ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 96–110.
- Полонский В.Ф. Метод типовых графиков для определения расходов воды в приливных устьях рек // Водные ресурсы. 1987. № 4. С. 105–113.
- Полонский В.Ф. Влияние приливов на распределение стока воды в дельте Печоры // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 20–27.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 662 с.
- Сухогрузов П.Г. Легенды и действительность. Очерки развития географических знаний о Севере и Коми крае с древнейших времен до начала XX века. Сыктывкар: Геопринт, 2000. 144 с.
- Урнышев А.П. Трансформация приливной волны в устье реки Печоры // Сер. Препринтов «Научн. докл.». АН СССР, УрО, Коми научн. Центр. Сыктывкар, 1989. Вып. 30. 20 с.
- Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития / под ред. В.Н. Коротаева и др. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.
- Юрьев Б.Н. Устье реки Печоры (Отчет по изысканиям в устье реки Печоры 1926–1934 гг. и физико-географический очерк) / Архангельск: Изд-во Сев. гос. морское пароходство. Бюро сев. портовых изысканий, 1935. 140 с.
- Abreu de C.H.M., Barros M.L.C., Brito D.C., Teixeira M.R., Cunha A.C. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the estuary of the Lower Amazon River, *Water*, 2020, vol. 12, 660 p., DOI: 10.3390/w12030660.
- Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River: 2D simulation, *J. Hydroinformatics*, 2018, vol. 20(4), p. 798–814, DOI: 10.2166/hydro.2018.051.
- Hoitink A.J.F., Jay D.A. Tidal river dynamics: Implication for deltas, *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, p. 240–272, DOI: 10.1002/2015RG000507.
- Losada M.A., Díez-Minguito M., Reyes-Merlo M.A. Tidal-fluvial interaction in the Guadalquivir River Estuary: Spatial and frequency-dependent response of currents and water levels, *J. Geophys. Res.*, 2007, vol. 122, no. 2, p. 847–865, DOI: 10.1002/2016jc011984.
- Lu S., Tong C., Lee D.-Y., Zheng J., Shen J., Zhang W., Yan Y. Propagation of tidal waves up in Yangtze Estuary during the dry season, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2015, vol. 120, p. 6445–6473, DOI: 10.1002/2014JC010414.
- Rollnic M., Rosario R.P. Tide propagation in tidal courses of the Para River estuary, Amazon Coast, Brazil, *J. Coastal Res.*, 2013, vol. 165 (SI65), p. 1581–1586, DOI: 10.2112/SI65-267.1.
- Sepulveda H., Valle-Levinson A., Framinan M. Observations of subtidal and tidal flow in the Rio de la Plata estuary, *Cont. Shelf Res.*, 2004, vol. 24, p. 509–525, DOI: 10.1016/j.csr.2003.12.002.
- Vennel R. ADCP Measurements of momentum balance and dynamic topography in a constricted tidal channel, *J. Phys. Oceanography*, 2006, vol. 36, p. 177–188, DOI: 10.1175/JPO2836.1.

Поступила в редакцию 02.03.2021

После доработки 15.06.2021

Принята к публикации 20.07.2021

TIDAL FLOW DYNAMICS IN THE PECHORA RIVER DELTA DURING SUMMER LOW WATER

A.M. Alabyan¹, A.N. Vasilenko², N.A. Demidenko³, I.N. Krylenko⁴,
E.D. Panchenko⁵, A.A. Popryadukhin⁶

^{1,2,4,6} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

³ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Scientific Researcher; e-mail: demidenko_nikola@mail.ru

⁵ Institute of Water Problems RAS, Laboratory of Hydrodynamics

¹ Associate Professor; Ph.D. in Geography; e-mail: andrei_alabyan@mail.ru

² Senior Lecturer; e-mail: saiiia24@mail.ru

⁴ Leading Scientific Researcher; Ph.D. in Geography; e-mail: krylenko_i@mail.ru

⁵ Junior Researcher; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

⁶ Engineer; e-mail: gidroartem@mail.ru

The results of a hydrological expedition of August 2020 to the Pechora River estuary make it possible to rethink the flow dynamics in the microtidal delta of the largest river in the Western sector of the Russian Arctic. Previously unknown features of cyclic changes in hydraulic parameters of the delta branches caused by tidal fluctuations in the sea level were discovered. The uneven change in water levels along the delta sea border, as the tidal wave moves westward along the shallow inlet of the Korovinskaya Guba Bay, caused the reverse currents and significant changes in the runoff distribution between the Pechora River main channel and principal delta branches. Under the total runoff of 1,9–2,0 thousand m³/s and the tide height of 1,0 m at the cape Bolvansky Nos the reverse currents occurred at the mouth of the Pechora River main channel with maximum flow of 4,76 thousand m³/s at low sea and 4,11 thousand m³/s towards the river at full tide. At the same time, no inflow of brackish water into the river was recorded. The main runoff redistribution in the delta occurs through reverse currents via the Mesino Strait near the Andeg village, where the Tundrovyy Shar and Sredny Shar arms branch off the Malaya Pechora River to the left side. During the tidal cycle the flow distribution and current dynamics in this node are extremely complex being the key factor of watering for the western part of the Pechora River delta. Depending on the tidal phase the river flow through the Malaya Pechora branch from the delta apex to the Andeg village exceeds the main navigation way of the Bolshaya Pechora branch by 10–18%. There was no transit flow in the right-bank Golubkovskiy Shar and Gorodetskiy Shar branches. The tidal level and discharge fluctuations were observed up to the Oksino gauge located 141 km upstream the mouth.

Keywords: runoff distribution, delta branches, tidal cycle, reversible currents, tidal wave propagation and transformation, Andeg node

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic research (project 18-05-60021 River runoff and changes in the water and ice-thermal regime of the estuarine regions and the sea coasts of Russian Arctic in the 21st century). Our special thanks to Eng. S.V. Platonov, member of the expedition, L.Yu. Sevastianova, Head of the Narian-Mal hydrometeorological station of the Northern UGMS, and the staff of the station, A.I. Bogunov and S.I. Chuprov, staff member of the Rosmorport, and F.A. Lichutin, owner of the Hanavej-Sya tourist center for their assistance in the organization of field work.

REFERENCES

- Abreu de C.H.M., Barros M.L.C., Brito D.C., Teixeira M.R., Cunha A.C. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the estuary of the Lower Amazon River, *Water*, 2020, vol. 12, 660 p., DOI: 10.3390/w12030660.
- Alabyan A.M., Alekseeva A.A., Krylenko I.N., Panchenko E.D., Popryadukhin A.A., Fingert E.A., Demidenko N.A., Lebedeva S.V. [Experience and problems of hydrological survey in tidal estuaries], *Inzhenernye izyskaniya v stroitel'stve*. Materialy Dvenadcatoy Obshherossijskoj konferencii izyskatel'skih organizacij [Engineering survey for construction. Proc. of 12th All-Russian conference of survey organizations], Moscow, Geomarketing Publ., 2016, p. 260–263. (In Russian)
- Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River: 2D simulation. *J. Hydroinformatics*, 2018, vol. 20(4), p. 798–814, DOI: 10.2166/hydro.2018.051.
- Alabyan A.M., Panchenko E.D., Alekseeva A.A. Osobennosti dinamiki vod v prilivnykh ust'jakh mal'nykh rek bassejna Belogo morja [Hydrodynamic features of small tidal estuaries of the White Sea basin], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, no. 4, p. 39–48. (In Russian)
- Balakina O.N., Volik V.A., Durkina L.M., Polonskii V.F. Sostojanie nabljudenij i rabot v ust'evoj oblasti Pechory [The state of observations and work in the Pechora mouth area], *Trudy GOIN* [Proc. of the State Oceanographic Institute], 2013, no. 214, p. 96–107. (In Russian)
- Borshchenko E.V., Mishin D.V., Gorelits O.V. [Integrated research of the hydrological regime of the Pechora River mouth], *Ot poznaniya k mirovozzreniju. Sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchnoi konferentsii pamjati Yu.B. Vinogradova* [From cognition to worldview. Collection of reports of the international scientific conference in memory of Yu.B. Vinogradov], St. Petersburg, VVM Publ., 2020, p. 1054–1059. (In Russian)
- Estuarno-del'ovye sistemy Rossii i Kitaja: gidrologo-morfologicheskie protsessy, geomorfologiya i prognoz razvitiya* [Estuarine-deltaic systems of Russia and China: hydrological and morphological processes, geomorphology and forecast of the development], Moscow, GEOS Publ., 2007, 445 p. (In Russian)
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR*, t. 1, Barentsevo more, vyp. 1, *Gidrometeorologicheskije usloviya* [Hydrometeorology and hydrochemistry of seas of the USSR, vol. 1, Barents Sea, iss. 1, Hydrometeorological conditions], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 280 p. (In Russian)
- Hoitink A.J.F., Jay D.A. Tidal river dynamics: Implication for deltas, *Rev. Geophys.*, 2016, vol. 54, p. 240–272, DOI: 10.1002/2015RG000507.
- Keizerling A., Kruzenshtern P. Pechorskij kraj v geograficheskom i gidrograficheskom otnosheniyakh. Iz putevykh nabljudenij [Pechora region in geographical and hydrographic terms. From travel observations], *Zhurnal Ministerstva vnutrennikh del*, 1851, no. 6, p. 421–455; no. 8, p. 71–101, 235–251; no. 9, p. 361–392. (In Russian)
- Losada M.A., Díez-Minguito M., Reyes-Merlo M.A. Tidal-fluvial interaction in the Guadalquivir River Estuary: Spatial and frequency-dependent response of currents and water levels. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 122(2), p. 847–865, DOI: 10.1002/2016jc011984.
- Lu S., Tong C., Lee D.-Y., Zheng J., Shen J., Zhang W., Yan Y. Propagation of tidal waves up in Yangtze Estuary during the dry season, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2015, vol. 120, p. 6445–6473, DOI: 10.1002/2014JC010414.

- Lupachev Yu.V. [Hydrological conditions of the Pechora mouth area and their possible changes during partial withdrawal of runoff from the basin], *Trudy GOIN* [Proc. of the State Oceanographic Institute], 1979, no. 143, p. 49–68. (In Russian)
- Lupachev Yu.V., Skriptunov N.A. [Currents and water exchange in the Pechora Bay], *Trudy GOIN* [Proc. of the State Oceanographic Institute], 1979, vol. 143, p. 83–101. (In Russian)
- Mikhailov V.N. Principles of typification and zoning of river mouth areas (analytical review), *Water Resources*, 2004, vol. 31, p. 1–11, DOI: 10.1023/B:WARE.0000013566.36892.f0.
- Mikhailov V.N. *Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashee i budushchee* [Mouths of Russian rivers: past, present, future], Moscow, GEOS Publ., 1976. 413 p. (In Russian)
- Miskevich I.V., Alabyan A.M., Korobov V.B., Demidenko N.A., Popryadukhin A.A. Short-term variability of hydrological and hydrochemical characteristics of the Kyanda estuary in Onega Bay, the White Sea (July 28–August 15, 2016). *Oceanology*, 2018, vol. 58, p. 350–353, DOI: 10.1134/S000143701803013X. (In Russian)
- Miskevich I.V., Korobov V.B., Alabyan A.M. Specifika inzhenerno-ekologicheskikh izyskaniy v prilivnykh ust'yakh mal'nykh rek zapadnogo sektora rossijskoj Arktiki [Specificity of engineering-ecological surveys in small tidal estuaries of the western sector of the Russian Arctic], *Engineering Survey*, 2018, vol. 12, no. 3–4, p. 50–61. (In Russian)
- Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsijam i postam* [Manual for hydrometeorological stations and gauges], Leningrad, 1968, vol. 9, no. 1, p. 271–274. (In Russian)
- Panchenko E.D., Alabyan A.M., Krylenko I.N., Lebedeva S.V. [Modeling of hydrodynamic processes in the Onega and Northern Dvina estuaries under various scenarios of climate changes] *Trudy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Morskie issledovaniya i obrazovanie: MARESEDU-2020"* [Proc. of IX International conference "Marine Research and Education MARESEDU-2020"], Tver', PoliPRESS Publ., 2020, vol. 2, p. 72–75. (In Russian)
- Pechorskoe more. Sistemnye issledovaniya (gidrofizika, gidrologiya, optika, biologiya, khimiya, geologiya, ekologiya, sotsioekonomicheskie problemy)* [The Pechora Sea. Systemic studies (hydrophysics, hydrology, optics, biology, chemistry, geology, ecology, socioeconomic problems)], Moscow, MORE Publ., 2003, 502 p. (In Russian)
- Polonskii V.F. [Distribution of water runoff in the mouth area of the Pechora River and the tendency of its change], *Trudy GOIN* [Proc. of the State Oceanographic Institute], 1984, no. 172, p. 96–110. (In Russian)
- Polonskii V.F. Metod tipovykh grafikov dlya opredeleniya raskhodov vody v prilivnykh ust'yakh rek [Method of typical plots for determining water discharge in the tidal estuaries], *Vodnye resursy*, 1987, no. 4, p. 105–113. (In Russian)
- Polonskii V.F. Vliyanie prilivov na raspredelenie stoka vody v del'te Pechory [Influence of tides on the distribution of water flow in the Pechora River delta], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2012, no. 2(6), p. 20–27. (In Russian)
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR, t. 3, Severnyi kraj* [Surface water resources of the USSR, vol. 3, The Northern region], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 662 p. (In Russian)
- Rollnic M., Rosario R.P. Tide propagation in tidal courses of the Para river estuary, Amazon Coast, Brazil, *J. Coastal Res.*, 2013, vol. 165(SI65), p. 1581–1586, DOI: 10.2112/SI65-267.1.
- Sepulveda H., Valle-Levinson A., Framinan M. Observations of subtidal and tidal flow in the Rio de la Plata estuary, *Cont. Shelf Res.*, 2004, vol. 24, p. 509–525, DOI: 10.1016/j.csr.2003.12.002.
- Sukhogruzov P.G. *Legendy i deistvitel'nost'. Ocherki razvitiya geograficheskikh znaniy o Severe i Komi krae s drevnejshikh vremen do nachala XX veka* [Legends and reality. Essays on the development of geographical knowledge about the North and the Komi Territory from the Ancient times to the beginning of the 20th century], Syktyvkar, Geoprint Publ., 2000, 144 p. (In Russian)
- Urnyshv A.P. [Transformation of a tidal wave at the mouth of the Pechora River], *Seriya Preprintov "Nauchnye Dokady". AN SSSR, UrO, Komi nauchnyj Tsentr* [Series of Preprints "Scientific Reports". USSR Academy of Sciences, Ural Branch, Komi Scientific Centre], Syktyvkar, 1989, no. 30, 20 p. (In Russian)
- Vennel R. ADCP Measurements of momentum balance and dynamic topography in a constricted tidal channel. *J. Phys. Oceanography*, 2006, vol. 36, p. 177–188, DOI: 10.1175/JPO2836.1.
- Yur'ev B. N. *Ust'e reki Pechory (Otchet po izyskaniyam v ust'e reki Pechory 1926–1934 gg. i fiziko-geograficheskij ocherk)* [Mouth of the Pechora River (Report on surveys at the mouth of the Pechora River in 1926–1934 and a physical and geographical outline)], Arkhangel'sk, Northern Marine Shipping, Bureau of Northern Ports Surveys Publ., 1935, 140 p. (In Russian)

Received 02.03.2021

Revised 15.06.2021

Accepted 20.07.2021