

УДК 556.51

ПРИЛИВНОЕ УСТЬЕ РЕКИ ВАРЗУГИ (РОССИЙСКАЯ СУБАРКТИКА): ПЕРВЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗИМНЕМ ГИДРОЛОГИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ¹

© 2024 г. П. Н. Терский^{a, c, *}, С. Л. Горин^b, Е. Д. Панченко^{a, d}, А. М. Алабян^d,
Н. Д. Ахмерова^d, А. Н. Василенко^d, В. А. Иванов^d, Е. А. Крастынь^d, Ж. М. Куликова^{c, d},
Д. А. Мигунов^{c, d}, А. А. Попрядухин^d, М. О. Фатхи^c, М. А. Харламов^a

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bВсероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, 105187 Россия

^cГосударственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, 119034 Россия

^dМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, 119991 Россия

*e-mail: pavel_tersky@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2023 г.

После доработки 19.10.2023 г.

Принята к публикации 25.10.2023 г.

На основе данных экспедиции, проведенной зимой 2020 г. в устье р. Варзуги (Терский берег Белого моря), а также с использованием сведений, полученных авторами в устьях других рек Белого моря (Мезень, Онега, Умба, Кянда, Тамиза и Кузрека), — показано, что для нижнего течения Варзуги характерно сильное влияние морских приливов, которое выражается в соответствующих колебаниях уровня, а также в периодическом возникновении обратных (приливных) течений и интрузии осолоненных вод. В связи с этим представлены характеристики перечисленных явлений и обсуждаются влияющие на них факторы (рельеф русла, речной сток, приливы и лед).

Ключевые слова: приливное устье, Варзуга, зимний гидрологический режим, смешение речных и морских вод, Белое море, экспедиционные исследования.

DOI: 10.31857/S0321059624020019 **EDN:** CISZQN

ВВЕДЕНИЕ

Варзуга — вторая по размеру река, протекающая в южной части Кольского п-ова, имеющая большое значение для региона Белого и Баренцева морей. С одной стороны, в ее бассейне воспроизводится одна из крупнейших и наиболее сохранных естественных популяций атлантических лососей. С другой стороны, в непосредственной близости от ее устья находится д. Кузомень, имеющая большую историческую и культурную ценность.

Первые гидрологические исследования на р. Варзуге были проведены еще в XIX в. [12]. Спустя сто лет (в 1933 г.) Ленинградское отделение Гидроэнергопроекта выполнило рекогносцировку реки на всем ее протяжении от устья до верховьев [2, 15]. В 1936 г. совместная экспедиция Всесоюз-

ного института озерного и речного рыбного хозяйства (ВНИОРХ) и Зоологического института АН СССР описала геологическое строение берегов, химический состав, характер донных отложений и донную фауну Варзуги и ее притоков [2, 15]. В 1960 г. Мурманское УГМС провело гидрологическое обследование устьевых участков 27 водотоков между д. Кузомень и пос. Умба, включая устье Варзуги. В 1980–1990-х гг. в нижнем течении Варзуги (д. Кузомень) выполнялась серия изысканий, посвященных вопросам берегоукрепления и лесомелиорации по закреплению нестабильных песков [7]. В 2000-х гг. в районе устья Варзуги проводились работы, посвященные динамике морского побережья Терского берега [3, 14], а также русловым процессам в нижнем течении реки [7]. С 1930-х гг. до настоящего времени в бассейне реки проводятся биологические исследования, в первую очередь направленные на изучение местной популяции семги (например, [11]).

Несмотря на относительно большое количество и разнообразие экспедиций, проводимых

¹ Экспедиция проведена при финансовой поддержке и в рамках госзадания кафедры Гидрологии суши и при поддержке НСО Географического факультета и за счет спонсорских средств частных лиц.

в бассейне Варзуги за почти два века исследований, гидрологический режим ее нижнего течения, подверженного влиянию приливов и сгонно-нагонных явлений, до недавнего времени оставался неизученным. Лишь в работе [7] есть некоторые сведения о таковом для летнего периода. Сведения о зимнем режиме приливного устья р. Варзуги отсутствовали.

Настоящая статья посвящена результатам экспедиции в устье Варзуги, которая проходила 28.01.2020–02.02.2020. Ее цель заключалась в исследовании основных закономерностей гидрологического режима устьевой области реки в зимний период. В это же время исследовались устья рек Умбы и Кузреки, и некоторая часть этих результатов вошла в эту статью. Данная работа продолжила цикл зимних исследований в устьевых областях рек Белого моря, проводимых сотрудниками и студентами кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ, а также сотрудниками ГОИН и ВНИРО. Ранее авторами были исследованы устья больших рек Онеги и Мезени, а также малых рек Тамицы и Кянды [5, 16].

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГИДРОЛОГО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Общие сведения

Варзуга берет начало в центральной части Кольского п-ова, течет в южном направлении и впадает в Белое море. Длина реки составляет 254 км, площадь водосбора — 9840 км². Крупнейшие притоки: Пана, Пятка, Серга и Кица. Река Кица впадает в Варзугу в пределах ее устьевой области, в 4.5 км от устьевого створа. Бассейн Варзуги заболочен, на его поверхности находится ряд небольших озер.

Единственный действующий гидрологический пост (г.п.) на реке расположен в 27 км от ее устьевого створа (в с. Варзуга). Он действует с 1935 г., замыкает водосбор площадью 7940 км². По данным наблюдений, на нем среднегодовой расход воды Варзуги за период 1936–2020 гг. составил 84.5 м³/с, при этом с 1981 г. наблюдается многоводный период со среднегодовым расхо-

дом воды 91.9 м³/с. Внутригодовое распределение стока соответствует Восточно-Европейскому типу водного режима рек по классификации Б.Д. Зайкова: для Варзуги характерны низкая устойчивая зимняя межень, высокое весеннее половодье и низкая летне-осенняя межень, прерываемая относительно небольшими дождевыми паводками [7]. Зимняя межень продолжается 120–130 дней. Минимальный сток воды приходится на февраль–март и составляет 24–25 м³/с. Период ледостава в среднем начинается во второй половине октября — начале ноября, заканчивается в конце апреля — начале мая. Толщина льда в русле реки ко второй половине зимы в среднем достигает 60–70 см (на г.п. Варзуга). Торосы, трещины и полыньи встречаются только на протяжении нескольких километров в нижней части устьевого участка реки, наиболее активно подверженных влиянию приливов. Выше устьевой области ледяной покров сплошной.

Зимние исследования в 2020 г. охватили нижнее течение Варзуги и ее устье на 27-километровом участке от устьевого створа до с. Варзуга. На участке 27–21 км от устьевого створа в русле реки находится каскад порогов, препятствующих распространению приливных и нагонных колебаний уровня воды. Речное русло здесь однорукавное, шириной от 100 до 300 м. На участке 21–8 км русло реки разветвлено цепью островов, его ширина постепенно увеличивается сверху вниз по течению от 300 до ≥800 м. Ниже, на участке 8–0 км, находится воронкообразный эстуарий, ширина которого в нижней части достигает 1 км. Русло здесь однорукавное, образовано затопленной слабоизвилистой русловой ложбиной и обширными песчано-илистыми мелководьями, часть которых в малую воду обсыхает. Летом на фарватере реки на участке 15–8 км глубины меняются от 0.9 до 2.7 м в отлив и от 1.2 до 3.7 м в прилив; на участке 8–0 км — от 1.6 до 4.7 м в отлив и от 2.7 до 5.8 м в прилив [7]. Устье реки частично блокировано от моря обширной косой. В этом месте русло резко сужается, образуя горловину шириной ~200 м с глубинами >6 м. Устьевое взморье Варзуги прикрыто от моря затапливаемыми в приливную фазу песчаными косами, которые выступают от устьевой горловины в сторону моря на 500–700 м.

Варзуга впадает в Белое море. Раньше в непосредственной близости от ее устья работали морские посты “Кашкаранцы” и “Чаваньга” (~40 км соответственно к западу и востоку от устья). В настоящее время ближайший действующий пост находится в губе Умбе (~120 км к западу от устья Варзуги). Помимо прочего, на нем проводятся ежечасные наблюдения за уровнем воды по мареографу. В прилегающей части моря наибольшие колебания уровня связаны с приливами, максимальные величины которых на взморье Варзуги достигают 2.0 м [1, 4]. В Белом море значительный вклад в суммарные колебания уровня воды вносят сгоны и нагоны, величины которых в Кандалакшском заливе в среднем за многолетний период оцениваются в 0.3 и 0.5 м соответственно [1, 4]. Максимальные измеренные величины сгонов и нагонов в Кандалакшском заливе составили 0.7 и 1.1 м соответственно [1, 4]. Для пунктов “Кашкаранцы” и “Чаваньга” диапазон колебаний уровня моря за многолетний период составляет 3.7 и 2.8 м соответственно [4].

Гидрометеорологические условия в период экспедиции

По данным метеостанции в с. Варзуга, во время экспедиции температура воздуха менялась от -25.5°C до -9.4°C (при норме в январе и феврале $\sim -8^{\circ}\text{C}$), высота снежного покрова составляла 71–75 см. Ветер был слабым (до 2 м/с), преимущественно с северных румбов.

По данным г.п. Варзуга, расположенном в с. Варзуга, в январе 2020 г. расходы воды в реке находились в пределах 50–55 м³/с и были значительно выше своей среднеемноголетней нормы для января (31.9 м³/с в 1981–2020 гг.). 30.01.2020 расход воды составил 42.8 м³/с. Поскольку зима в 2019–2020 гг. в северных районах Европейской части России началась позже своих климатических сроков, ледостав на р. Варзуге установился лишь в конце декабря – начале января, т. е. более чем на месяц позже нормы. В результате этого толщина речного льда к моменту начала экспедиции не достигла своих среднеемноголетних величин.

По данным Мурманского УГМС, в январе 2020 г. неустойчивый характер погоды затянул

процесс установления ледостава и нарастания толщины льда на реках Мурманской области. Установление ледостава на реках завершилось в последних числах декабря – начале января, т. е. примерно на месяц позже среднеемноголетних дат. Нижний участок эстуария (0–2 км от устьевого створа) покрылся льдом только после сильного похолодания 02.02.2020. В море в период работ был плавучий лед. В непосредственной близости от устья р. Варзуги отмечались припай и навалы льда на подводных отмелях устьевого бара.

Прибрежная часть Белого моря была свободна ото льда: лишь в непосредственной близости от устья реки периодически появлялись скопления плавучего льда. Приливы на устьевом взморье в период экспедиции составляли 1.1–1.5 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В течение полевых работ измерялись следующие гидрологические характеристики (рис. 1):

– уровень и температура воды на пяти автономных постах (0, 4, 9.5, 15, 19.5 км от устья реки с геодезической привязкой к условной системе высот);



Рис. 1. Нижнее течение р. Варзуги на космоснимке (Google Earth): H, T, S – места установки автоматических приборов, измеряющих уровень, температуру и соленость воды соответственно; T, S, V – полусуточная станция с измерением скорости, температуры и солености воды (рейдовая вертикаль); Q – места измерения расходов воды; 1–8 – пункты экспедиционных наблюдений от устьевого створа; 9 – гидрологический пост р. Варзуга – с. Варзуга.

- соленость и температура воды на четырех автономных постах (0, 2, 4, 7 км от устья реки);
- глубина русла и толщина льда по фарватеру реки на участке от 2 до 15 км от устья (через каждые 0.5 км);
- температура и соленость воды через каждые 0.5 км вдоль фарватера реки в пределах зоны проникновения осолоненных вод (гидрологические съемки);
- скорость и направление течения, температура и соленость воды по глубине в течение одного приливного цикла в 4.5 км от устья (рейдовая станция);
- расход воды в р. Кице.

Наблюдения за уровнем воды. В пределах устьевой области р. Варзуги было организовано 5 уровневых постов (в 0, 4, 9.5, 15 и 19.5 км от устьевого створа). Они были оборудованы автономными регистраторами гидростатического давления и температуры воды “StarOddi” и “Keller”, установленными на дне (рис. 1). Интервал записи составлял 5 мин, точность измерения давления — 1–2 см водяного столба. Результаты измерений самописца (суммарное давление столба воды и атмосферного давления) корректировались по данным об атмосферном давлении с метеостанции “Кашкаранцы” путем вычитания из ряда суммарного давления ряда атмосферного давления, полученного по данным [17].

Геодезические работы проводились для привязки регистраторов уровня воды к единой (условной) системе высот. Для этого были использованы приемники глобальной навигационной спутниковой системы “Javad” и EFT в режиме “статика”.

Стационарные наблюдения за соленостью и температурой воды выполнялись с помощью четырех автономных регистраторов температуры и солености воды “StarOddi”, установленных на расстояниях 0, 2, 4 и 7 км от устьевого створа (рис. 1). Приборы устанавливались таким образом, что их измерениями была охвачена вся зона смешения.

Гидрологические съемки проводились для исследования зоны смешения в полную и малую воду. Для этого использовался зонд “YSI 600” с датчиками глубины, температуры и солености

воды. В реке и эстуарии съемки проводились по фарватеру с продольным шагом 500 м. Съемки проводились два дня с частичным захватом циклов полной и малой воды. Участок начала съемки был задан в районе устьевого створа (~400 м в сторону моря в малую воду и 500 м во время полной воды). Движение было направлено от устья вверх по течению приблизительно по линии фарватера. В полную воду съемка велась до момента достижения участка границы вод с соленостью <1 епс, которая принималась за границу зоны смешения. На устьевом взморье измерения выполнялись с берега. Шаг зондирования по вертикали составлял 0.5–1 м. Всего состоялось 3 съемки — одна в низкие малые и две в высокие полные воды.

Измерение скоростей и направлений течений проводилось на полусуточной станции в центре эстуария (рис. 1). При этом использовался акустик-доплеровский профилограф течений “Teledyne RiverRay ADCP” с применением программного обеспечения WinRiver II и SxS Pro. Общая продолжительность измерений составила ~12 ч (от низких малых до высоких полных вод) с интервалом 30–60 мин. Измерениями была охвачена вся толща воды от поверхности до дна.

Расход воды р. Кицы измерен гидрометрическим способом (скорость—площадь) с использованием гидрологической вертушки “Valeport”. Створ измерений был выбран выше области влияния приливов. Расходы воды р. Варзуги (г.п. Варзуга) предоставлены Росгидрометом (ГМС “Умба”).

Ледомерная съемка проводилась на участке 0–15 км от устьевого створа реки по поперечным створам, размещенным через каждые 500 м вдоль оси потока. На створах измерения толщины льда выполнялись в трех-четыре точки, одна из которых была на фарватере, а другие — справа и слева от него на расстоянии ~50 м друг от друга.

Таблицы предвычисленных приливов, содержащие данные о ежечасных уровнях воды для устья р. Варзуги, предоставлены ГОИНОм.

Положение линии фарватера определено по данным о промерах глубин, выполненным И.В. Крыленко летом 2016 г. [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Приток речной воды

По данным Мурманского УГМС, расход воды р. Варзуги на г.п. Варзуга 30.01.2020 составил $42.8 \text{ м}^3/\text{с}$ [16]. Согласно измерениям в настоящем исследовании, расход воды в р. Кице в тот же день составил $8.3 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, суммарный приток речной воды в устьевую область р. Варзуги 30.01.2020 составил $51.1 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ледяной покров

Согласно данным спутниковых снимков с ресурса Planet.com [18], 28.01.2020 на устьевом взморье р. Варзуги образовался припай льда, при этом в море наблюдались дрейфующие льдины. 02.02.2020 после сильного похолодания устьевая область полностью покрылась льдом.

Ледомерная съемка показала следующее. На участке 0–2 км от устьевого створа лед либо отсутствовал, либо имел настолько малую толщину, что работать на нем было невозможно. На участке 0–6 км лед был толщиной 15–30 см, на 7–12 км – от 40 до 60 см; на 13–15 км – 35–55 см (в отдельных местах <30 см – скорее всего, над гребнем речного переката).

Керн льда, выпиленный в районе д. Кузоmeni (4.5 км от устьевого створа), имел четырехслойную структуру. Верхний слой, 2–3 см – мутный снеговой лед; 3–10 см – непрозрачный лед с большим количеством пузырьков воздуха; 10–16 см – мутный кристаллический лед без включений; внизу, 16–23 см – прозрачный кристаллический лед.

Трансформация приливной волны

В январе 2020 г. приливные колебания распространялись по р. Варзуге до 19.5 км от ее устья (рис. 2). Выше этого места находятся пороги, которые служат естественным пределом проникновения приливов. Приливная волна при своем движении по эстуарию и устьевому участку реки взаимодействует с встречным речным потоком, льдом, а также русловым рельефом. В резуль-

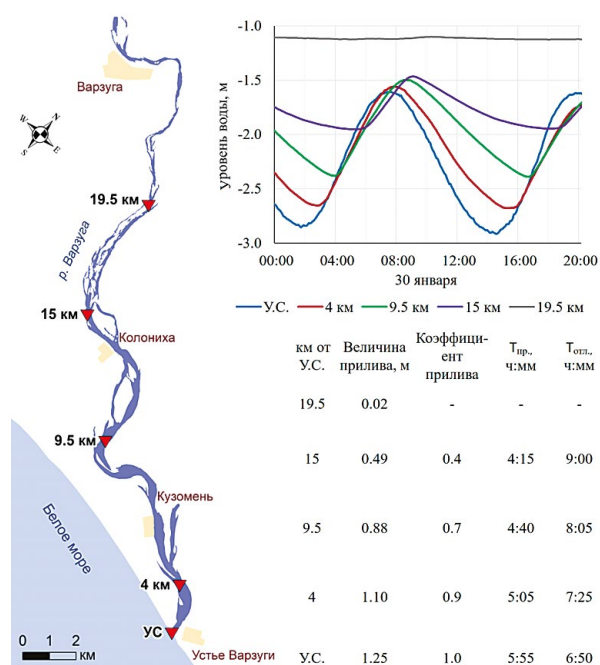


Рис. 2. Трансформация приливной волны в нижнем течении р. Варзуги 30.01.2020: У.С. – устьевой створ р. Варзуги; $T_{пр}$ – продолжительность приливной фазы; $T_{отл}$ – продолжительность отливной фазы.

тате этого величина приливов последовательно уменьшалась (рис. 2). При этом нарастала асимметрия волны (время приливной фазы уменьшалось, а время отливной фазы увеличивалось) и происходил ее сдвиг вправо (рис. 2). В 15 км от устья полные воды (ПВ) наступали на 1.5 ч позже, а малые воды (МВ) – почти на 4 ч позже таковых в устье (рис. 2).

Проникновение осолоненных вод

Наблюдения показали, что морская вода проникала в эстуарий р. Варзуги с каждым приливом (дважды в сутки). Наибольшая дальность проникновения осолоненных вод, определенная по предельному положению изогалины 1 епс, составила ~7.5 км (рис. 3).

На приливе осолоненные воды распространялись вверх по эстуарию в виде клина со средней скоростью движения фронтальной поверхности (~1.3 км/ч). В полные воды водная толща в основании клина была хорошо перемешана, а на его дистали наблюдалась выраженная стратификация (рис. 3). После наступления полных вод движение клина еще некоторое время про-

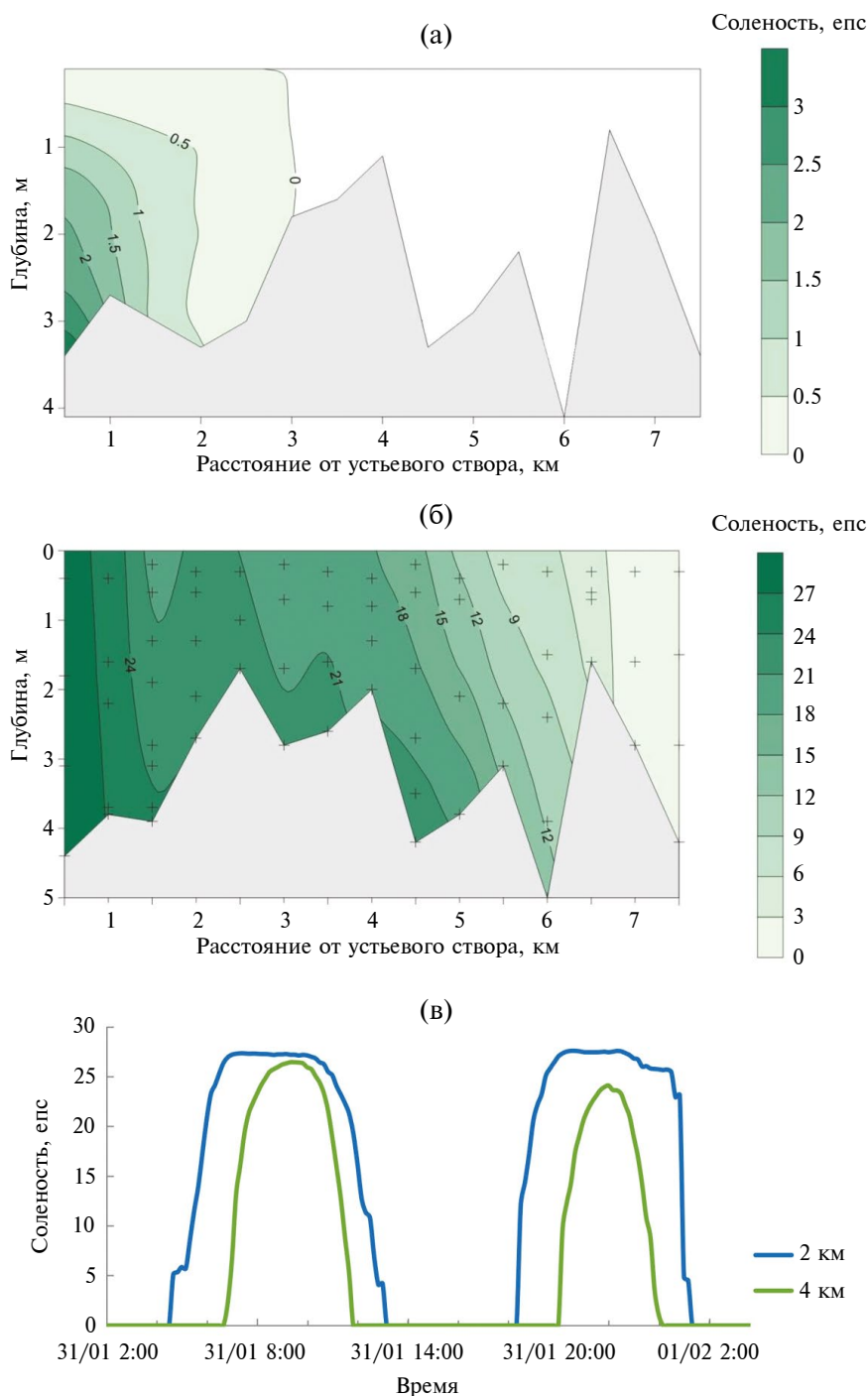


Рис. 3. Продольный профиль солёности в период малой (а) и полной (б) воды; график придонной солёности воды в створах на фарватере в 2 и 4 км от устьевго створа (на рис. 1 пункты 2 и 3 соответственно) (в) в эстуарии р. Варзуги 31.01.2020–01.02.2020 (знаками “+” помечены точки измерения солёности).

должалось в придонном слое, хотя в большей части водной толщи течение уже поворачивало в сторону моря. В это время по всей протяженности зоны смешения наблюдалась наибольшая стратификация. В отлив осолоненные воды сбрасывались в море. Ко времени наступления

малых вод эстуарий почти полностью заполнялся пресной водой.

Около устьевго створа осолоненные воды присутствовали постоянно: в отлив солёность здесь снижалась до 2–3 епс, а в прилив она повы-

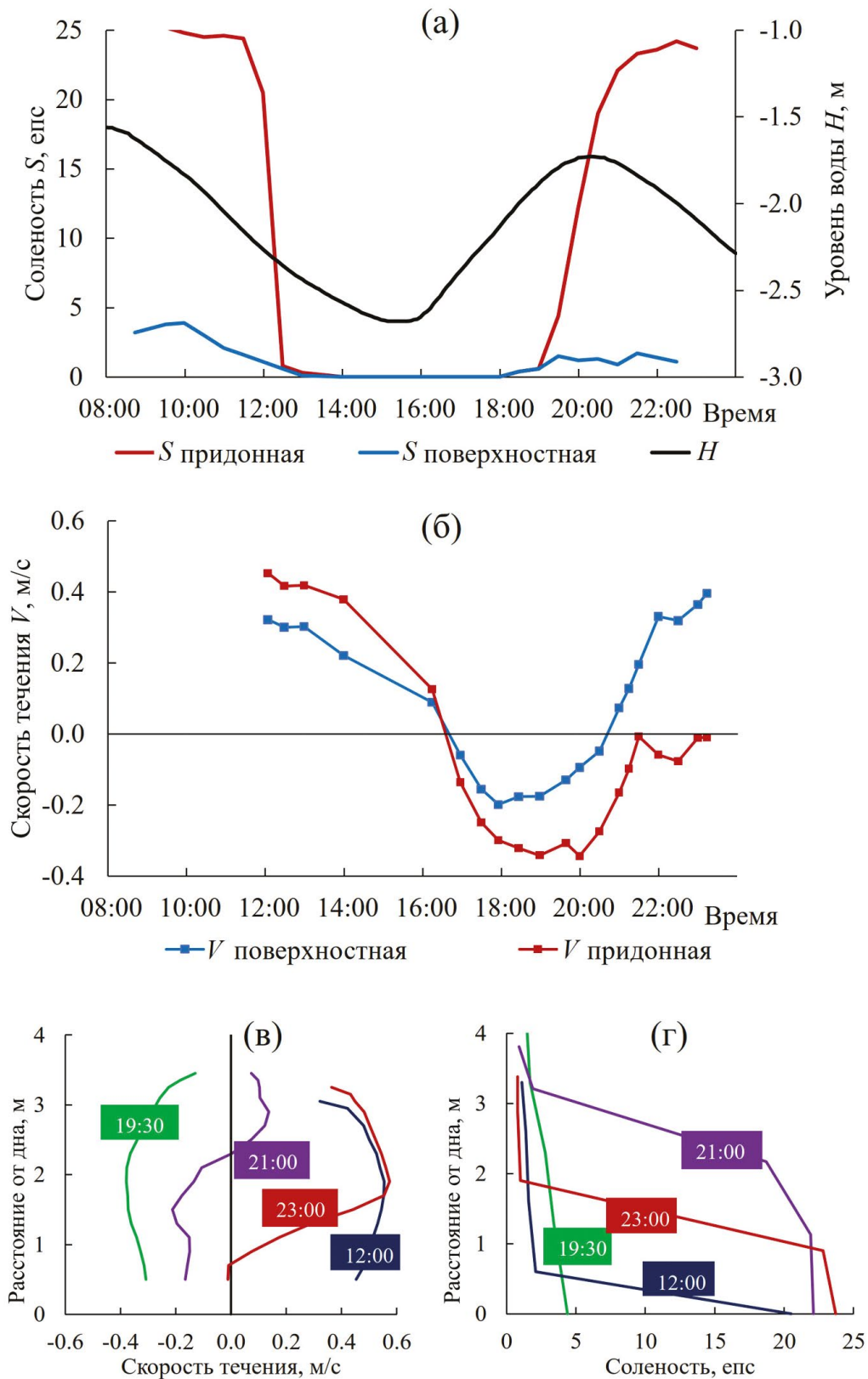


Рис. 4. Уровень воды, скорость течения и соленость в течение приливного цикла по данным измерений на фарватере в 4.5 км выше устьевового створа Варзуги (на рис. 1 п. 4).



Рис. 5. Нижнее течение р. Варзуги и выделенные границы распространения характерных явлений (по результатам экспедиционных исследований в январе–феврале 2020 г.).

шалась до 28 епс (рис. 3). В средней части эстуария (в 4 км от устьевых створа) они фиксировались на протяжении 4–5 ч каждого приливного цикла (~12.5 ч).

Приливная изменчивость гидрологических характеристик в эстуарии

Наблюдения на рейдовой вертикали (4.5 км выше устьевых створа) (рис. 1) за скоростью течения, соленостью и температурой воды были выполнены с 8:45 до 23:15 30.01.2020. Уровень воды измерялся на посту, расположенном на 0.5 км ниже рейдовой вертикали (рис. 1). Глубина на вертикали менялась от 2.3 м в отлив до 3.0 м в прилив.

Наблюдения начались через 0.5 ч после ПВ, а завершились спустя 2.5 ч после ПВ. Таким образом, ими был охвачен весь полусуточный приливный цикл. С начала наблюдений и до ~15:30 уровень воды в эстуарии падал (был отлив). Затем до ~20:20 наблюдался прилив, а после него — снова отлив (рис. 4). В течение 3 ч после начала измерений (т. е. в первую половину отлива) в придонном слое сохранялась высокая соленость (до 20 епс), хотя большая часть водной толщи уже была пресной (рис. 5). При этом вода на всех горизонтах текла в сторону моря. Только в середине отлива (между 12:00 и 12:30) соленость у дна резко уменьшилась с 20 до 0.8 епс и на рейдовой вертикали не осталось осолоненных вод. Имен-

но в этот период скорость отливного (прямого) течения достигла своего максимума 0.49 м/с в середине водной толщи (на глубине 1.6–1.7 м от дна), 0.32 и 0.43 м/с на поверхности и у дна соответственно (рис. 4). Затем скорость отливного течения постепенно ослабевала.

Течение сменило свое направление с прямого на обратное через 1 ч после начала прилива (в ~16:40). Своей наибольшей скорости (0.34 м/с) приливный поток достиг в 18:30–19:00, т. е. во второй половине прилива. В это же время на рейдовой вертикали появилась осолоненная вода (соленость у дна превысила 1 епс) (рис. 5). В течение следующего часа соленость воды у дна быстро нарастала и достигла 19 епс. При этом в поверхностном слое соленость оставалась невысокой. Благодаря этому на вертикали возникла сильная стратификация вод, достигшая своего максимума в период ПВ (в 20:30 вертикальный градиент солености воды составлял 4.4 епс/1 м).

Сразу после наступления ПВ (в ~20:30) течение в поверхностном слое повернуло к морю (рис. 4). При этом у дна оно еще ~2 ч оставалось обратным, хотя и постепенно ослабевало. В это время соленость воды у поверхности уменьшалась, а у дна продолжала нарастать. Максимум придонной солености (24.2 епс) был измерен в 22:30, т. е. спустя 1.5 ч после ПВ. Затем течение у дна повернуло на отлив и началось постепенное отступление осолоненной воды. По-видимому,

это пример эстуарной циркуляции, суть которой заключается в одновременном существовании стока пресных вод на поверхности и притока осолоненных вод у дна. Движение воды в поверхностном слое поддерживается градиентами уровня, направленными в сторону моря, а в придонном слое — градиентами солености, направленными в обратную сторону.

Почти 2/3 приливного цикла вертикальное распределение скорости течения воды было квазиравномерным (со слабо выраженным максимумом в центре и минимумами у дна и подо льдом). Эта закономерность нарушалась лишь в период существования эстуарной циркуляции.

По результатам экспедиции в нижнем течении р. Варзуги в зимнее время можно выделить три гидрологических участка (рис. 5). На первом (27–20 км от устья) участке гидрологические условия соответствуют речным (выше границы 3 на рис. 5 — зимой здесь не выявлены приливные колебания уровня). На втором участке (20–8 км от устья) вода всегда пресная, но заметны полусуточные приливные изменения уровня воды. Скорее всего, здесь есть и соответствующие колебания скорости течения: в прилив она уменьшается, а в отлив увеличивается. На третьем участке (8–0 км) все основные гидрологические характеристики (уровень, температура, соленость, скорость и направление течения воды) имеют выраженную полусуточную приливную изменчивость (между границами 1 и 2 на рис. 5). Гидрологические условия здесь колеблются в широких пределах: от речных (на минимуме отлива) до морских (на максимуме прилива).

Сопоставление с устьями других рек Белого моря

Для понимания того, какое место устье р. Варзуги (по особенностям его зимнего режима) занимает среди других устьев Белого моря, сопоставлены имеющиеся сведения. В предыдущие годы авторами статьи были проведены зимние экспедиции в устья больших и малых рек Белого моря [5]. Некоторые результаты этой работы получены непосредственно коллективом авторов, опубликованы впервые и представлены в табл. 1. Выводы о характере гидрологических

процессов и оценка влияния факторов солености, приливов, рельефа, стока и льда, приведенные ниже, опираются на результаты натурных наблюдений и являются дискуссионными.

Уровень воды. Общая закономерность для всех исследованных авторами рек состоит в том, что в период ледостава дальность проникновения приливных колебаний уровня в их руслах ограничивается перекатами и порогами. У малых рек при прочих равных условиях (рельеф территории бассейна и величина приливов на взморье) дальность проникновения приливов меньше, чем у больших и средних рек (в Кянде и Тамие по сравнению с Онегой, а также в Кузрезе по сравнению с Варзугой) (табл. 1). В первом случае приливы охватывают первые километры русла, а во втором случае они распространяются на десятки километров (табл. 1). Это можно объяснить тем, что у малых водотоков продольный профиль русла выработан значительно слабее, чем у более крупных рек. На эту закономерность накладывается влияние местных факторов, также ограничивающих проникновение приливов. Например, в устье Мезени — это “ледяные плотины”, которые практически ежегодно образуются в некоторых местах устьевого участка реки [9]. А в устье Умбы — это наличие промежуточного водного объекта (узкого и глубокого залива — одноименной губы — с порогом на входе, находящегося между рекой и морем), а также выходов коренных пород в месте впадения реки в губу. Во всех реках приливная волна перекашивается — по мере удаления от моря продолжительность приливной фазы уменьшается, а отливной фазы увеличивается. В больших реках это может приводить к тому, что колебания уровня в устьевом створе и в вершине устьевой области происходят в противофазе.

Скорость течения. Во всех реках обратные (приливные) течения охватывают более половины зоны приливных колебаний уровня (табл. 1). В крупных реках относительные размеры зоны обратных течений больше, чем в малых. В качестве типичной особенности вертикальной структуры поля скоростей можно отметить следующее. В больших и средних реках возможно возникновение двухслойной циркуляции, вызванной противоположно на-

Таблица 1. Основные характеристики зимнего режима устьев рек Белого моря (по данным предшествующих исследований коллектива авторов)

Район	Онежский залив				Мезенский залив	Кандалакшский залив и Терский берег			
Река	Онега		Кянда	Тамица	Мезень	Варзуга	Умба	Кузрека	
Общие характеристики									
$Q_{\text{ср}}$, м ³ /с год/ январь/ май 1941–2018	522/192/ 2050		5.36/1.97/ 21.0	4.88/1.80/ 19.1	878/245/ 3860	105/31.9/ 444	81.6/41.9/ 166	3.02/1.37/ 10.8	
F (устье), км ²	56900		510	465	78000	9840	6470	255	
Зимние характеристики (по результатам полевых исследований)									
Период работ	27.01– 1.02.17	27.01– 4.02.19	1–3.02.17	1–2.02.19	31.02– 4.02.17	29.01– 3.02.19	28.01– 2.02.20	27.01– 3.02.20	29.01– 2.02.20
Q	74.5	110	(1–2)	(1–2)	1.08	225	42.8	48.2	–
V (взморье), м	2.4–2.9	2.2–2.7	2.6–2.9	2.4–2.5	2.6–2.9	5.5–7.5	1–1.1	1.1–1.2	1.0–1.3
V (УС), м	1.6–1.7 (нагон)	1.1–1.4 (сгон)	–	1.2–1.4	1.6	–	1.1–1.3	1.1–1.2	–
$L_{\text{прил}}$, км	20–22	18–22	8–10	8–10	2–2.5	56–(60)	20	2.2	>2
$L_{\text{обр теч}}$, км	17–18 20 (нагон)	–	>4.5	>3.5	>0.8	39–40	–	(2.2)	–
$L_{\text{осол}}$, км	2.5–3 3.8–4 (нагон)	0	4–4.5	3–3.5	0.6–0.8	<30	7.5	0.5–2	0.9–1

Обозначения: УС – устьевой створ; Q – расход речной воды в вершине устьевой области; F – площадь водосбора реки; V (взморье), м – предвычисленная величина прилива на устьевом взморье; V (УС), м – измеренная величина прилива в устьевом створе; $L_{\text{прил}}$, км – дальность распространения приливных колебаний уровня воды; $L_{\text{обр теч}}$, км – дальность распространения реверсивных течений; $L_{\text{осол}}$, км – дальность проникновения вод соленостью более 1 епс; (50) – величины в скобках являются оценочными.

правленными градиентами уровня и плотности воды. В малых реках такое явление практически не возникает.

Осолонение. Во всех исследованных устьях происходит интрузия осолоненных вод во время прилива (табл. 1). В большинстве случаев осолоненные воды в отливную фазу полностью покидают речные русла. Но в устьях рек Умбы и Мезени осолонение сохраняется постоянно. В первом случае осолоненные воды накапливаются в котловине устьевого залива (в губе Умба), чему содействуют малый сток речной воды, характерный для зимы, и отсутствие ветрового перемешивания придонного слоя осолоненных вод с вышележащими пресными водами из-за льда. Во втором случае осолонению способствуют очень высокие приливы на фоне низкого речного стока, а также отсутствие ветрового перемешивания и наличие в русле реки значительных пле-

сов. В устье Онеги зимой 2019 г. удалось увидеть проявление другого фактора, ограничивающего интрузию осолоненных вод (табл. 1). В этот год мелководья в вершине Онежского залива (между устьевым створом реки и о. Кий) были забиты навалами льда. Свободной от него оставалась только стоковая ложбина, соединяющая реку и центральную часть Онежского залива. Поэтому поток, выходящий из реки на взморье, не растекался по его поверхности, а концентрировался внутри этой ложбины. То есть благодаря льду на взморье речное русло как бы удлинилось на несколько километров, и это привело к тому, что, несмотря на малый расход воды в реке, осолоненные воды престали в нее проникать (табл. 1). Приведенное здесь описание – предположение авторов настоящей статьи. Эта трактовка наилучшим образом соответствует увиденной картине ледовых явлений, а также результатам измерений (в том числе солености воды на взморье

и в русле реки) в устье Онеги зимой 2019 г. Предположение согласуется с сообщениями в [8] и [9], в которых говорится, что в устье Онеги зимой “лед препятствует осолонению” и “несмотря на меньшую величину стока, дальность проникновения осолоненных вод подо льдом меньше, чем в летнюю межень”.

Роль льда. В большинстве исследованных объектов ледяной покров не влияет на дальность распространения приливных колебаний уровня, поскольку она ограничена русловым рельефом. Только в макроприливном устье р. Мезени навалы льда могут создавать препятствия для распространения приливов [10]. На поле скоростей влияние льда более ощутимо. Во-первых, лед изолирует стоково-отливные и приливные потоки от воздействия ветра (как попутного, так встречного); во-вторых, он приводит к некоторому уменьшению скорости поверхностных течений из-за трения о нижнюю поверхность льда; во-третьих, он на мелководьях и у берегов концентрирует потоки в более глубоководной части русла. На осолонение речных устьев лед может оказывать как стимулирующее, так и противоположное ему влияние. С одной стороны, ледяной покров препятствует ветровому перемешиванию, что уменьшает размывание клина осолоненных вод и тем увеличивает дальность его проникновения. С другой стороны, лед перекрывает мелководья на устьевом участке реки, этим концентрируя речной поток в центральной части русла. Скорее всего, это уменьшает осолонение устьев по сравнению с тем, что было бы в них при тех же величинах речного стока и приливов в отсутствие льда. Такие же последствия могут быть от навалов льда на устьевом взморье, как показано выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, проведенные в устье р. Варзуги зимой 2020 г., показали следующее. Для нижнего течения реки характерно сильное влияние морских приливов, которое выражается в соответствующих колебаниях уровня, а также в периодическом возникновении обратных (приливных) течений и интрузии осолоненных вод. Наибольшая дальность распространения приливов и осолонения в реку составила 20 и 7.5 км соответственно.

Выше 20 км от устьевого створа наблюдаются речные гидрологические условия. На участке 20–8 км вода речная пресная, наблюдаются полусуточные колебания уровня воды. На нижнем участке уровень воды, температура, соленость, скорость и направление течения имеют полусуточную приливную изменчивость.

В зоне проникновения осолоненных вод в отдельные периоды приливного цикла возникает двухслойная (эстуарная) циркуляция вод, при которой пресная вода на поверхности движется в сторону моря, а осолоненная вода у дна перемещается вверх по речному руслу.

Сопоставление результатов экспедиций, проведенных в устье р. Варзуги, а также в устьях больших и средних рек Мезени, Онеги, Умбы, малых рек Тамицы, Кянды и Кузреки, позволило выделить общие черты зимнего гидрологического режима этих объектов и основные факторы его формирования (в том числе роль льда).

Коллектив авторов выражает благодарность А.П. Хромову и Л.Н. Чепур (ГМС “Умба”) за предоставленные фондовые данные, А. Двинину и И. Дерябиной (д. Кузомень) за предоставленные жилые помещения, Н.А. Кожину (с. Умба) за консультации и помощь экспедиции, Н.А. Демиденко и А.В. Дунюшину за поддержку и помощь в организации экспедиции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. II. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 240 с.
2. Жадин В.И. Фауна рек и водохранилищ // Тр. Зоол. ин-та. М.; Л., 1940. Т. 5. Вып. 3/4. 992 с.
3. Зарецкая Н.Е., Репкина Т.Ю. Новые данные по истории Терского берега Белого моря в голоцене (район устья р. Варзуги) // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международ. науч. конф. (школы) по морской геологии. Т. III. М.: ГЕОС, 2015. С. 186–189.
4. Инжебейкин Ю.И. Колебания уровня Белого моря. Дис. ... докт. геогр. наук. 2004. СПб.: ИЭПС УО РАН, 2004.

5. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017–2020 гг. / Под ред. *П.Н. Терского, Е.Д. Панченко, С.Л. Горина* и др. // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 6. С. 1006–1008.
6. *Крастынь Е.А., Фатхи М.О., Панченко Е.Д., Иванов В.А., Куликова Ж.М., Смирнова Д.А., Шишов А.А.* Зимний режим приливных устьев рек Терского берега Белого моря // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 1092–1097.
7. *Крыленко И.В., Липка О.Н., Суткайтис О.К.* Причины и последствия изменения русла в нижнем течении реки Варзуги. М.: WWF, 2018. 200 с.
8. *Кураева Л.Н., Лупачев Ю.В.* Особенности циркуляции и перемешивания вод в устьевой области Онеги // Тр. ГОИН. Вып. 179. 1986. С. 11–17.
9. *Михайлов В.Н.* Гидрологические процессы в устьях рек. М.: ГЕОС, 1997. 176 с.
10. *Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А.* Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 383 с.
11. *Потуткин А.Г.* Миграции атлантического лосося (*Salmo salar* L.) в прибрежном районе Белого моря и бассейне реки Варзуга: Дис. ... канд. биол. наук. Мурманск: ПИНРО, 2004. 125 с.
12. *Рейнеке М.Ф.* Гидрографическое описание северного берега России. Ч. 1–2 / Сост. *М. Рейнеке*. СПб.: Гидрографический департамент, 1878–1883. http://kolanord.ru/html_public/col_russkii_sever/Reyneke_MF
13. *Риппас П.Б.* Кольская экспедиция 1898 года. Предварительный отчет // Изв. Имп. Рус. геогр. об-ва. 1899. Т. 35. Вып. 3. С. 292–312. http://qwercus.narod.ru/rippas_1898.htm
14. *Сафьянов Г.А., Шевченко Н.В.* Особенности гранулометрической дифференциации наносов микроприливногo берега // Материалы XXII Международ. береговой конф. “Проблемы управления и устойчивого развития прибрежной зоны моря”. Тезисы / Под ред. *Л.А. Жиндарева*. Геленджик, 2007. С. 172–175.
15. *Яковлев В.А., Кашулин Н.А.* Об истории лимнологических исследований на Кольском Севере // Вестн. Кольского НЦ РАН. 2012. № 4. С. 117–138.
16. <https://gmvo.skniivh.ru/>
17. <https://rp5.ru>
18. <https://www.planet.com/>
19. *Panchenko E., Lebedeva S., Terskii P., Leummens M.* Hydrodynamics of the Onega river tidal estuary as a basis for ecosystem monitoring // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. 263. 012014. P. 1–6.
20. *Pettitt A.N.* A non-parametric approach to the change-point problem // J. Royal Statistical Soc. Ser. C (Applied Statistics). 1979. V. 28 (2). P. 126–135. doi:10.2307/2346729