

УДК 556.546

А.М. Алабян¹, Е.Д. Панченко², А.А. Алексеева³

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ВОД В ПРИЛИВНЫХ УСТЬЯХ МАЛЫХ РЕК БАССЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ

Использование новейшего гидрометрического и геодезического оборудования при выполнении полевых работ в мезоприливных устьях малых рек Кянда и Тамица, впадающих в Онежскую губу Белого моря, позволило исследовать особенности распространения приливных волн вверх по руслам рек и динамики реверсивных течений. Исследованы вариации гидравлических характеристик в течение приливного цикла в рамках одномерной схематизации речного потока. Отмечено парадоксальное гидродинамическое явление – отрицательная турбулентная вязкость, природа которого исследована в связи с механизмом диссипации энергии в турбулентных потоках на фоне циклических колебаний уровня воды и реверсивных течений в приливных устьях.

Ключевые слова: мезоприливая устьевая область; Кянда; Тамица; приливный цикл; реверсивное течение; отрицательная турбулентная вязкость; гидравлическое сопротивление.

Введение. Устья рек бассейна Белого моря являются уникальными водными объектами, для которых характерно весьма разнообразное проявлений гидрологических и гидродинамических факторов как морского, так и речного генезиса. Многообразие морфологических типов устьевых областей рек, впадающих в Белое море (от эстуариев до многоорукавных дельт), а также диапазон изменения параметров речного стока и величины прилива в разных частях морского побережья позволяют рассматривать Беломорский бассейн как уникальный природный полигон для гидродинамических исследований.

В то время как морфология, гидрологический режим и гидродинамические особенности устьев крупных рек Беломорского бассейна – Северной Двины, Онеги и Мезени – исследованы достаточно детально, устьевым областям многочисленных малых рек уделялось значительно меньше внимания. Однако в последние годы в связи с возрастающим интересом к вопросам ресурсного, транспортного и рекреационного потенциала Российской Арктики в исследовании устьев малых северных рек, являющихся своеобразными «калитками в материк» с Северного морского пути, начался новый этап. Появление принципиально нового гидрометрического и геодезического оборудования, такого как акустико-доплеровские измерители течений, автономные регистраторы уровня воды и дифференциальные системы спутникового позиционирования, позволили выполнять гидрологические исследования со значительно большей полнотой и детальностью. В приливных устьях, где изменение уровней воды, направления и скорости течения происходят очень быстро, изучение некоторых аспектов гидродинамики потока традиционными методами (с использовани-

ем гидрометрических вертушек и геометрического нивелирования) ранее было в принципе невозможно.

В августе 2016 г. в ходе полевых работ в устьевых областях малых рек Кянда и Тамица, впадающих в Онежский залив Белого моря, была выполнена серия гидрометрических измерений, направленных на получение натурных данных для калибровки и верификации гидродинамических моделей, в частности для исследования изменений гидравлических параметров речного потока в течение приливного цикла [Мискевич с соавт., 2018]. В ходе измерения параметров реверсивных течений был зарегистрирован редкий гидродинамический феномен – отрицательная турбулентная вязкость [Алабян, Панченко, 2017], это явление ранее было теоретически предвидено [Форхгеймер, 1935; Lorenz, 1953; Старр, 1971], но в натурных условиях практически не изучалось.

Ранее группа исследователей из Института водных проблем АН СССР опубликовала результаты аналогичных гидрометрических измерений в приливном устье р. Онеги при ледоставе [Дебольский, Зырянов, Мордасов, 1984]. Анализ изменения формы эпюры вертикального распределения скорости потока в течение приливного цикла показал, что некоторые его черты могут быть объяснены только в случае допущения отрицательных значений коэффициента турбулентного обмена (равного произведению турбулентной вязкости на плотность жидкости).

Принимая во внимание, что турбулентная вязкость является главным фактором, определяющим гидравлическое сопротивление турбулентных потоков [Великанов, 1954; Фидман, 1991], допущение ее отрицательных значений приводит к допущению «отрицательного гидравлического сопротивления», что

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент, канд. геогр. н., e-mail: andrei_alabyan@mail.ru

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, магистрант, e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, магистрант, e-mail: anna-artemovna@yandex.ru

на первый взгляд противоречит не только основным принципам термодинамики, но и просто здравому смыслу. Однако, как писал А.С. Монин в предисловии к русскому изданию книги профессора метеорологии Массачусетского технического университета В. Старра «Физика явлений с отрицательной вязкостью» [1972, с. 5]: «Действительно, вводимые в молекулярной физике коэффициенты вязкости ..., характеризующие физические свойства жидкостей и газов, всегда положительны, и это имеет глубокое обоснование в термодинамике необратимых процессов. Поэтому было нетрудно привыкнуть к предположению, что коэффициенты турбулентной вязкости ..., вводимые в полуэмпирические теории турбулентности по аналогии с молекулярной физикой, также всегда положительны, хотя такое предположение уже не имеет термодинамического обоснования, и, как оказалось, в ряде случаев просто неправильно».

Природа «отрицательной турбулентной вязкости» или «отрицательного гидравлического сопротивления» может быть объяснена с точки зрения современных представлений о механизме диссипации кинетической энергии в турбулентных потоках («каскад Колмогорова»). Энергия осредненного течения передается крупномасштабным турбулентным образованиям, от них к все более мелким вихрям, а при достижении субмолекулярных размеров вихрей кинетическая энергия переходит в тепловую. Если существенная часть энергии турбулентных пульсаций не переходит в тепло, а возвращается осредненному течению (а с теоретической точки зрения «противопоказаний» этому процессу нет [Монин, Яглом, 1965; Фидман, 1991]), то гидравлическое сопротивление может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Например, если энергия пульсаций переходит в тепло и возвращается осредненному течению в равных долях – то гидравлическое сопротивление исчезает, а если возврат превосходит диссипацию (то есть происходит «контрдиссипация» энергии поступательного движения), то оно становится отрицательным. В этом случае вместо потери энергии осредненным движением происходит его подпитка энергией пульсаций, в результате чего скорость течения увеличивается.

Полученные в ходе полевых работ в мезоприливных устьевых областях рек Кянда и Тамица гидрометрические данные дают основание полагать, что отрицательное гидравлическое сопротивление в некоторые фазы приливного цикла может иметь место, причем его появление не носит характер случайных выбросов, а соответствует вполне устойчивым временным промежуткам.

Математическая основа анализа. Для расчетов неустановившегося движения воды в реках в рамках одномерной модели (параметры потока осреднены по его поперечному сечению) используется система уравнений Сен-Венана, в начале прошлого века называемых также уравнениями Буссинеска [Христианович, 1938]. Эта гиперболическая система дифференциальных уравнений в частных произ-

водных состоит из уравнения движения (1) и уравнения неразрывности (2):

$$\frac{\alpha_0}{g} \frac{du}{dt} + \frac{\alpha u}{dt} \frac{du}{dx} = I - I_{mp}, \quad (1)$$

$$\frac{d(u\omega)}{dx} + \frac{d\omega}{dt} = 0, \quad (2)$$

где x – координата по оси, направленной по течению, I – «геометрический» уклон водной поверхности (принимается положительным при понижении водной поверхности в направлении оси x , соответствующем «нормальному» течению из реки в море), g – ускорение свободного падения, ω – площадь поперечного сечения потока, u – средняя скорость течения, t – время, α – коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии), α_0 – коэффициент Буссинеска (корректив количества движения).

Члены правой части уравнения движения (1) принято называть инерционными или конвективными:

$i_{vt} = \frac{\alpha_0}{g} \frac{du}{dt}$ характеризует локальное ускорение, $i_{vx} = \frac{\alpha u}{g} \frac{du}{dx}$ – конвективное ускорение. Их сумма обуславливает разницу между геометрическим уклоном I и уклоном трения I_{mp} («фрикционным членом»), который обычно выражается через скорость течения, гидравлический радиус русла R (приблизительно равный его средней глубине) и его гидравлическое сопротивление, выражаемое через коэффициенты Шези C , Маннинга n или Дарси-Вейсбаха λ :

$$I_{mp} = \frac{u^2}{C^2 R} = \frac{n^2 u^2}{R^{\frac{2}{3}}} = \frac{\lambda u^2}{8gR}.$$

При расчетах неустановившегося движения в реках и неприливых устьях инерционными членами уравнения (3) вполне справедливо пренебрегают, так как они обычно оказываются на несколько порядков меньше уклона трения [Михайлов, 1970], который в конечном счете и определяет значение геометрического уклона водной поверхности (сила тяжести уравновешивается силой трения). Неустановившийся характер течения в половодья и паводки в этом случае учитывается лишь уравнением (2), и система Сен-Венана может быть преобразована к уравнению кинематической волны [Кучмент, Демидов, Мотовилов, 1983].

В приливных устьях рек такое допущение невозможно из-за значительно более динамичного неустановившегося характера течений и значимости инерционных эффектов. Кроме того, когда водная масса периодически перемещается в направлении, противоположном оси x , а скорость течения и геометрический уклон могут принимать отрицательные значения, фрикционный член записывается в виде

$$I_{mp} = \frac{u|u|}{C^2 R} = \frac{n^2 u|u|}{R^{\frac{2}{3}}} = \frac{\lambda u|u|}{8gR}, \quad (4)$$

чтобы обеспечить направление действия силы гидравлического трения в сторону, противоположную направлению течения [Михайлов, 1970; Savenije, 2012] (иными словами, чтобы уклон трения $I_{тр}$ имел бы тот же знак, что и скорость u).

В некоторых случаях (обычно для крупных устьевых областей) в уравнение движения могут быть добавлены члены, отражающие влияние силы Кориолиса, горизонтального градиента атмосферного давления, различной плотности речной и морской воды, влияние ветра. Однако для мезоприливных устьев малых рек их значения пренебрежимо малы по сравнению с инерционными членами уравнения (1) и уклоном трения.

В обычных реках значения коррективов скорости α и α_0 мало отличаются от единицы и при записи уравнения (1) ими зачастую пренебрегают, однако в приливных устьях, особенно при наличии реверсивных течений, они могут иметь существенно большее значение при расчете инерционных членов [Полонский, Горелиц, 1985].

Объект и методика исследований. Все величины, входящие в уравнение движения (1), кроме уклона трения, могут быть рассчитаны на основании непосредственных полевых измерений скоростного поля потока и уровней воды, а фрикционный член определяется как разность между геометрическим уклоном и инерционными членами. Исходя из полученного таким путем значения уклона трения, гидравлическое сопротивление рассчитывается по формуле (4). При этом следует иметь в виду, что при отрицательном гидравлическом сопротив-

лении (в случае контрдиссипации кинетической энергии) для его характеристики может быть использован только параметр Дарси-Вейсбаха λ , отрицательные значения которого имеют физический смысл (в отличие от коэффициентов Шези и Маннинга, которые в формуле (4) фигурируют в квадрате).

Оценка значимости членов уравнения неустановившегося движения и параметров гидравлического сопротивления, а также их вариация в течение приливного цикла была выполнена на основании результатов полевых исследований, проведенных в августе 2016 г. в устьевых областях малых рек Кянда и Тамица.

Кянда впадает в Кяндский залив, расположенный в юго-восточной части Онежской губы Белого моря (рис. 1, А), устье реки подвержено воздействию полусуточных приливов величиной 2–2,5 м. На устьевом участке протяженностью около 9 км русло свободно меандрирует, имеет плавный продольный профиль дна. Поперечный профиль русла корытообразный, с глубинами в межень на отливе 0,2–0,3 м на перекатах и 1,5–2 м на плесах. Ширина русла обычно составляет 30–40 м, постепенно увеличиваясь в направлении моря и достигая 100–120 м в районе устьевого створа во время прилива. Вода Кяндского залива имеет соленость около 20‰ и проникает в прилив вверх по руслу на расстояние 5–6 км от устьевого створа.

Тамица впадает в Онежскую губу в 15 км южнее Кяндского залива, ее устье (рис. 1, Б) подвержено воздействию таких же приливов, как и устье Кянды, однако ввиду особенностей морфологии

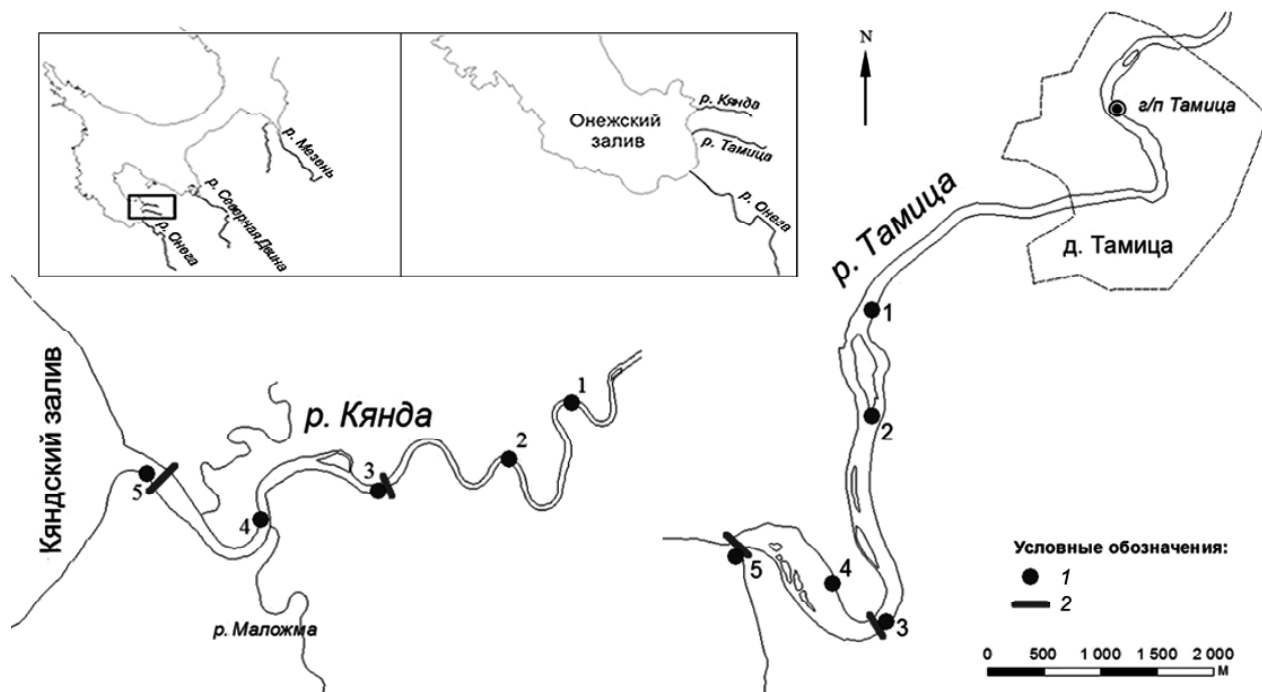


Рис. 1. Схема устьевых участков рек Кянда и Тамица. Обозначения: 1 – места расположения логгеров и их номера, 2 – гидрометрические створы

Fig. 1. Estuaries of the Kyanda (a) and Tamitsa (b) rivers. 1 – location of loggers and their numbers, 2 – discharge sections, 3 – state hydrological station – нет в русском варианте! – М.А. ??????

взморья и конфигурации устьевых створов в русло реки морская вода проникает лишь эпизодически. Длина устьевых участков реки составляет около 2 км, он состоит из крутой излучины, относительно прямолинейного участка и разветвления, выше которого приливные колебания практически не прослеживаются. Ширина русла на большей части устьевых участков составляет около 50–70 м, увеличивается до 180–190 м в разветвлении, а также в нижнем крыле излучины, вновь сужаясь к устьевому створу до 40–45 м.

Реки близки по гидрологическому режиму и водоносности, площадь водосбора Кянды составляет 510 км², Тамицы – 465 км². На Тамице в 4,5 км выше устьевых створов в одноименной деревне расположен гидрологический пост. Приливные колебания уровня воды до него не доходят, норма стока составляет 8,5 м³/с, максимальный расход весеннего половодья достигает 190 м³/с.

В ходе полевых работ 4 августа на Кянде и 12 августа 2016 г. на Тамице было выполнено исследование распространения приливной волны по устьевым участкам. Для этого на различном удалении от устьевых створов были установлены пять автономных записывающих устройств («логгеры» фирм Solinst и Keller), запрограммированных на ре-

гистрацию уровней воды каждые пять минут. Для приведения данных об уровнях к единой системе высот производился учет колебаний атмосферного давления и планово-высотная привязка логгеров с использованием дифференциальной системы спутникового позиционирования, состоящей из приемников Trimble 5700, Javad Triumph-VS и Javad Triumph-1.

В нижних частях устьевых участков (у логгеров 3 и 5) в течение приливного цикла были выполнены синхронные измерения расходов воды акустическими доплеровскими профилографами типа RiverRay фирмы TeledyneRD-instruments. Длина исследуемых участков составила 3,3 км на Кянде и 0,75 км на Тамице. Измерения расхода воды производились через 30 минут, а при приближении экстремумов уровней и расходов – через 15 минут. Каждое измерение включало в себя два последовательных прохождения створа от одного берега до другого и обратно. Расчет расходов воды и средней скорости течения выполнялся непосредственно в ходе измерений с использованием программы WinRiver II.

Расчет геометрического уклона водной поверхности на исследуемых участках проводился по данным логгеров 3 и 5, а информация с логгеров 1, 2 и 4 использовалась для контроля и анализа. Расчет конвективных членов уравнения движения (1) выполнялся по центральной разностной схеме с осреднением по времени и по длине участков. Значения морфометрических характеристик русла определялось как среднее арифметическое их значений на границах участка и относилось к моменту времени, среднему между измерениями.

Результаты измерений. Приливная волна, приходящая из акватории Белого моря к устью Кянды, при движении по отмелому устьевому взморью значительно трансформируется, теряя изначально синусоидальную форму и становясь асимметричной с более коротким периодом роста уровня воды и продолжительной фазой отлива. 4 августа (в сизигию) величина прилива в устьевом створе Кянды (логгер 5) составила 2,12 м, а на расстоянии 6,4 км (логгер 1) – 1,89 м (рис. 2, А), то есть здесь не произошло существенного уменьшения высоты приливной волны. Однако произошла дальнейшая трансформация ее формы: время роста уровня в устьевом створе составило 4 часа 5 минут, время падения – 8 часов 20 минут, а для логгера 1 в 6,4 км выше – 2 часа 45 минут и 9 часов 40 минут соответственно.

К устьевому створу Тамицы приливная волна подходит имея практически симметричную форму, однако затухание волны при движении по взморью и вверх по руслу Тамицы в силу геоморфологических особен-

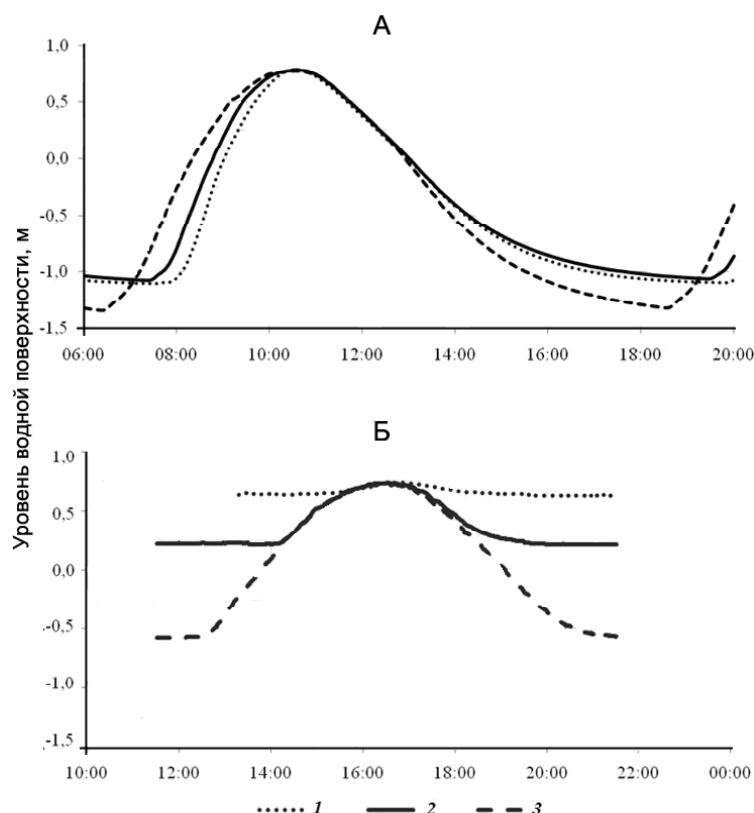


Рис. 2. Изменения уровня водной поверхности в устьевой области р.Кянды за приливный цикл 4.08.2016 г. (А) и р.Тамицы за приливный цикл 12.08.2016 г. (Б). Обозначения: 1 – логгер 1; 2 – логгер 3; 3 – логгер 5

Fig. 2. Water level oscillations along estuaries of the Kyanda River during the tide of 4.08.2016 (А) and the Tamitsa River during the tide of 12.08.2016 (Б). 1 – logger 1, 2 – logger 3, 3 – logger 5

ностей ее устьевой области (в первую очередь из-за большего уклона дна и обилия перекатов) происходит значительно интенсивнее (рис. 2, Б). Имея 12 августа на морском крае величину 2,0 м, приливная волна вошла в устьевой створ (логгер 5), имея высоту лишь 1,3 м, у верхнего створа расчетного участка в вершине излучины (логгер 3) – 0,5 м, а выше разветвления, на расстоянии 3,3 км от устьевового створа (логгер 1) – менее 0,1 м.

Характер трансформации приливной волны при ее продвижении вверх по руслу Кянды и Тамицы существенно различается: если на Кянде преобладает изменение соотношений времени прилива и отлива, то на Тамице при сохранении формы волны, близкой к симметричной, происходит уменьшение времени проявления приливных колебаний уровня. Причиной этого является существенное различие в уклонах водной поверхности на устьевых участках рек в момент, когда влияние морского фактора не прослеживается – около 2‰ для Тамицы и 0,1‰ для Кянды. По той же причине скорость распространения волны прилива в устьях исследуемых рек также существенно различается, она составила на Кянде 3 км/ч, на Тамице – 0,5 км/ч.

Характерной особенностью движения волны по руслу как Кянды, так и Тамицы является практически одновременное наступление максимумов уровня воды во всех створах (рис. 2). При этом, если в устье Кянды при прохождении волны прилива области с обратным уклоном водной поверхности выражены четко (рис. 3), то в устье Тамицы в прилив водная поверхность приближается к горизонтальной за счет постепенного уменьшения уклонов на перекатах. Заслуживает внимания тот факт, что отлив на всем протяжении устьевых участков обеих рек начинается практически одновременно, и в первые 2,5–3 часа происходит при почти горизонтальной водной поверхности.

Расход воды в устьевом створе Кянды в течение приливного цикла изменялся в диапазоне от «минус» 136 м³/с (отрицательные значения расхода воды соответствуют движению воды вверх по руслу в прилив) до «плюс» 85 м³/с. Смена направления движения потока и знака соответствующего расхода воды произошла примерно через два часа после начала приливного подъема уровня (рис. 4, А). Максимальная отрицательная скорость течения составила 0,62 м/с и наблюдалась на час раньше экстремума расхода воды, а следующий после этого максимум уров-

ня воды наступил еще через полтора часа. Временной ход расходов и скоростей течения воды в отлив в верхнем створе исследуемого участка р. Кянды (у логгера 3) был аналогичен описанному выше изменению гидрологических характеристик в устьевом створе. Максимальный приливный расход воды составил там «минус» 55 м³/с, максимальный расход воды на отливе был равен 34 м³/с, при этом стокосый речной расход воды составлял 5 м³/с. Смена направления течения реки наблюдалась на полчаса позже, чем в устьевом створе, а максимальный отрицательный расход воды в верхнем и устьевом створе был зафиксирован практически одновременно.

К устьевому створу р. Тамицы диапазон изменения расходов воды значительно меньше, чем в устье Кянды. При этом максимальный отливный расход, составивший 25 м³/с, превосходил приливный расход, равный «минус» 17 м³/с при стокосом расходе 8 м³/с. Кроме того, в отличие от устья р. -

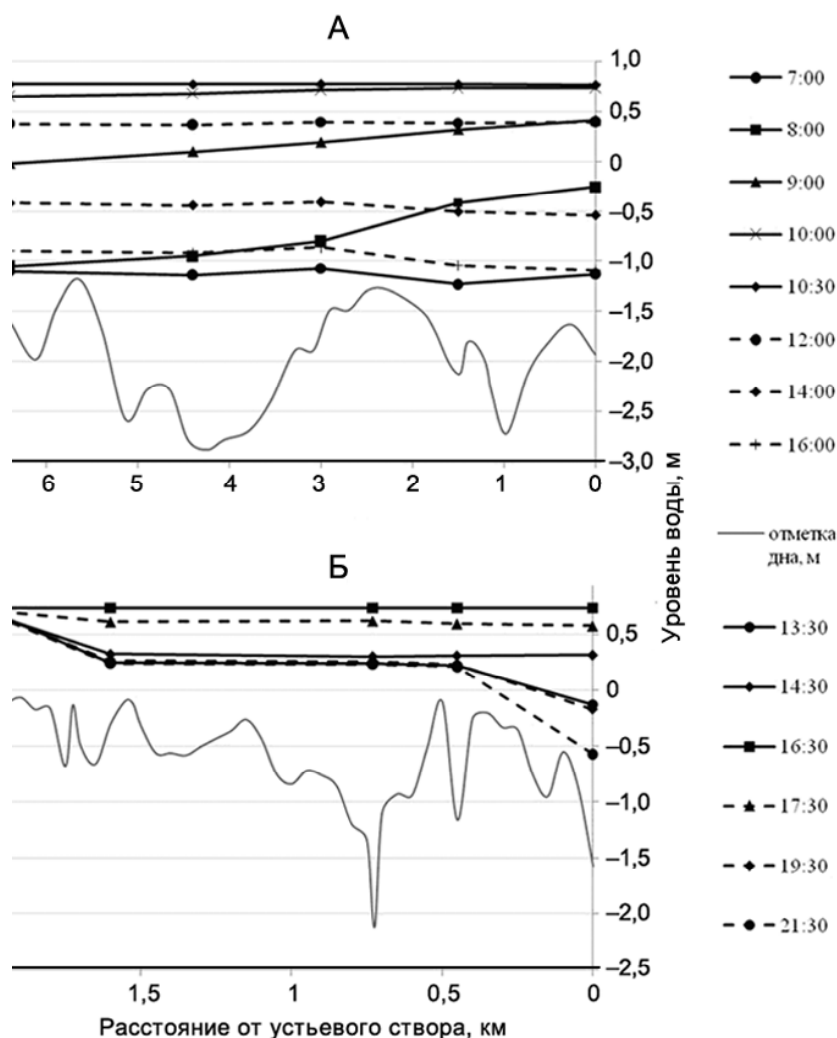


Рис. 3. Трансформация продольного профиля водной поверхности на устьевом участке р. Кянды в ходе приливного цикла 4.08.2016 г. (А) и р. Тамицы в ходе приливного цикла 12.08.2016 г. (Б)

Fig. 3. Transformation of water surface longitudinal profile of the Kyanda River estuary during the tide of 4.08.2016 (A) and the Tamitsa River estuary during the tide of 12.08.2016 (B)

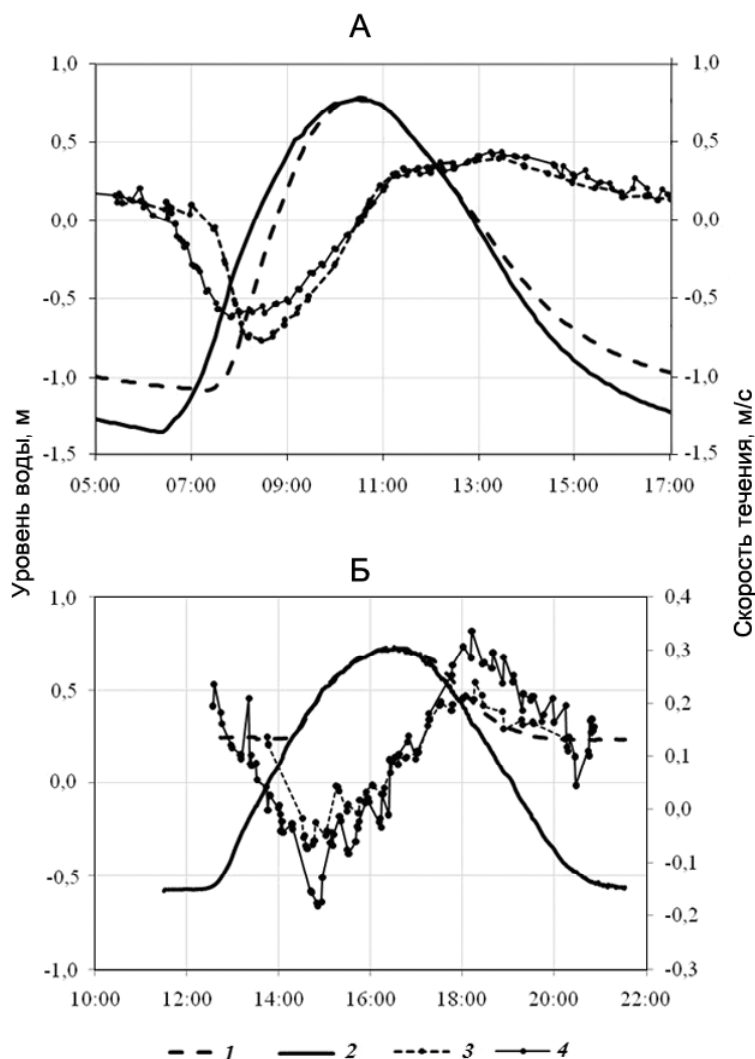


Рис. 4. Изменения средней скорости течения и уровня воды на границах экспериментального участка р. Кянды за приливный цикл 4.08.2016 г. (А) и р. Тамицы за приливный цикл 12.08.2016 г. (Б). Обозначения: 1 – уровень в верхнем створе (логгер 3), 2 – уровень в нижнем створе (логгер 5), 3 – скорость в верхнем створе, 4 – скорость в нижнем створе

Fig. 4. Oscillations of mean flow velocity and water level at the border sections of the Kyanda River experimental reach during the tide of 4.08.2016 (A) and the Tamitsa River experimental reach during the tide of 12.08.2016 (B). 1 – water level at the upper boundary (logger 3), 2 – water level at the lower boundary (logger 5), 3 – velocity at the upper boundary, 4 – velocity at the lower boundary

Кянды здесь наблюдались существенные пульсации величины расхода и скорости течения с периодом в десятки минут (рис. 4, Б), которые отчетливо фиксировались как инструментально, так и визуально. Устойчивая смена направления течения в прилив произошла через 1,5 часа после начала роста уровня, а еще через 1 час наступил максимум приливного расхода. Рост уровня в верхнем створе исследуемого участка р. Тамицы начался на 2 часа позже, чем в устьевом створе после постепенного затопления порожистого участка русла непосредственно выше по течению. Далее рост уровня на концах исследуемого участка происходил практически синхронно до начала отлива. Максимальный приливный расход к верхней границе исследуемого уча-

стка уменьшился почти в четыре раза до «минус» $4,8 \text{ м}^3/\text{с}$, при том, что отливный расход практически не уменьшился, составив $16 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таким образом, если на Кянде волна прилива формируется в основном за счет массы морской воды, проникающей в реку и распространяющейся вверх по течению, то на Тамице волна происходит большей частью за счет торможения речного стока переменным подпором со стороны моря.

Анализ результатов. В конце фазы отлива и до начала прилива, когда влияния моря не наблюдается, устьевые участки по морфологии и гидродинамическим чертам мало отличаются от «нормальных» рек: наблюдался значительный прямой уклон водной поверхности, и значение уклона трения во много раз превосходит суммарную величину инерционных членов. На Кянде 4 августа этот период четко прослеживается после 14:00, а на Тамице 12 августа – после 18:00 (табл.). Существенное преобладание величины фрикционного члена над инерционными характерно на Кянде также в прилив для периода значительных обратных уклонов водной поверхности с 7:30 до 9:00, когда скорости приливного (обратного) течения максимальны.

Однако в период приближения максимума уровня (10:45) и около двух часов после начала отлива (до 12:15) в устье Кянды при практически горизонтальной водной поверхности (рис. 3, А, табл.) течение воды в сторону моря происходило с увеличивающейся скоростью по всей длине исследуемого участка. При этом наибольшее значение в уравнении движения (1) имел первый инерционный член (локальное ускорение), вследствие чего фрикционный член принимал отрицательные значения. Таким образом, в данный временной отрезок скорость течения и в уравнении (1) имела знак «плюс», а уклон трения Itr – знак «минус», то есть гидравлическое сопротивление оказывалось отрицательным. Таким образом, была зарегистрирована парадоксальная ситуация – сила «гидравлического сопротивления» не препятствовала движению воды, а способствовала ему.

Действительно, в этот временной интервал (при нулевом уклоне водной поверхности) сила тяжести не могла быть основной действующей силой, перемещающей массы воды, как это происходит в «нормальных» реках. Во время проведения работ ни ветра, ни существенных горизонтальных градиентов атмосферного давления зарегистрировано не было. Гидростатические силы, обусловленные разностью плотностей речной и морской воды, действуют в направлении от моря к реке и также не могли быть причиной ускорения отливного течения. Таким образом, единственной силой, способной оказать воздействие,

Изменение составляющих уравнения движения и коэффициентов гидравлического сопротивления в течение приливного цикла на устьевых участках изученных рек

Время	i_{vt}	i_{vx}	I	I_{mp}	u , м/с	$C, \sqrt{\frac{M}{c}}$	n	A
	10^{-6}							
Кянда, 04.08.2016 г.								
6:00	-3,29	0,199	95,6	98,7	0,091	11,3	0,08	0,62
6:30	-4,18	-0,093	90,6	94,9	0,025	2,89	0,33	9,41
6:45	-6,62	0,137	58,2	64,67	-0,026	-	-	-6,42
7:00	-9,35	0,988	18,1	26,5	-0,095	-	-	-0,19
7:15	-11,83	2,373	-38,2	-28,7	-0,189	39,1	0,02	0,05
7:30	-15,5	4,87	-107	-96,2	-0,314	32,7	0,03	0,07
8:00	-11,8	-0,477	-181	-169	-0,555	35,6	0,03	0,06
8:30	1,77	-4,14	-125	-122	-0,644	41,9	0,03	0,04
9:00	6,87	-2,40	-73,7	-78,1	-0,568	43,1	0,03	0,04
9:30	9,84	-1,74	-24,5	-32,6	-0,420	46,6	0,02	0,04
10:00	11,4	-0,780	-7,94	-18,6	-0,233	33,3	0,04	0,07
10:30	14,0	0,002	3,33	-10,7	-0,008	1,55	0,76	32,7
10:45	12,7	-0,122	3,33	-9,21	0,101	-	-	-0,19
11:00	9,55	-0,317	0,00	-9,23	0,200	-	-	-0,05
11:15	5,85	-0,193	0,00	-5,66	0,264	-	-	-0,02
11:30	2,19	-0,291	0,00	-1,90	0,303	-	-	-0,004
11:45	0,89	-0,17	0,00	-0,71	0,323	-	-	-0,001
12:00	8,18	-0,174	-3,33	-11,3	0,274	-	-	-0,028
12:15	0,73	-0,466	0,00	-0,27	0,338	-	-	-0,0004
12:30	1,21	-0,262	3,33	2,38	0,357	154	0,01	0,003
13:00	2,41	0,312	16,7	13,9	0,389	74,1	0,02	0,014
14:00	-2,11	0,734	44,2	45,5	0,373	44,5	0,02	0,04
15:00	-2,04	0,438	65,0	66,6	0,280	31,7	0,03	0,08
16:00	-1,26	0,054	76,5	77,7	0,195	24,0	0,04	0,14
Тамица, 12.08.2016 г.								
14:00	-5,2	-0,1	209	215	0,010	0,67	1,50	174
14:15	-4,2	0,2	34,4	38,4	-0,032	-	-	-3,31
14:30	-2,4	0,5	-17,3	-15,4	-0,064	15,0	0,07	0,35
14:45	-0,4	0,7	-9,5	-9,8	-0,075	21,3	0,05	0,17
15:00	1,2	0,6	12,4	10,6	-0,071	-	-	-0,22
15:15	2,1	0,5	9,0	6,5	-0,053	-	-	-0,25
15:30	2,3	0,2	-15,1	-17,6	-0,034	6,57	0,16	1,82
15:45	2,6	0,1	10,7	8,0	-0,013	-	-	-6,18
16:00	2,9	-0,1	-5,7	-8,5	0,013	-	-	-6,43
16:30	3,5	-0,3	4,3	1,1	0,072	55,1	0,02	0,03
17:00	4,2	0,2	14,2	9,8	0,135	34,7	0,03	0,07
17:30	3,9	1,7	64,2	58,6	0,209	22,0	0,05	0,16
18:00	0,9	3,4	107	103	0,257	20,4	0,05	0,19
18:30	-1,0	3,0	213	211	0,249	14,0	0,08	0,40
19:00	-1,7	2,3	372	371	0,223	9,90	0,11	0,80
19:30	-1,7	1,5	612	612	0,195	6,81	0,15	1,69
20:00	-1,6	0,9	841	842	0,164	5,15	0,20	2,96

соизмеримое с ускорением течения (характеризуемым первым инерционным членом уравнения движения), могла быть только сила «гидравлического сопротивления» (характеризуемая фрикционным членом), которую здесь уместнее назвать силой, обусловленной переходом энергии пульсационных течений к осредненному движению водной массы. Здесь также следует отметить, что расчет величины инерционных членов выполнялся без учета коррективов скорости, значения которых не могут быть меньше единицы. В случае их учета величина локального ускорения, а следовательно, и модуль отрицательного уклона трения были бы еще больше.

Аналогичная ситуация, когда средняя по участку скорость течения и уклон трения имеют разные знаки, наблюдалась на Кянде и в начале прилива, однако в течение значительно менее продолжительного времени (6:45–7:00). При этом приливное течение по длине исследуемого участка только начинало формироваться, и направление течения на концах участка было различным. На Тамице появление временных отрезков, когда скорость течения и уклон трения имеют разные знаки также были отмечены в фазу прилива на фоне заметных пульсаций уровня, расхода воды и скорости течения, имеющих период порядка первых десятков минут (природу которых еще предстоит выяснить).

Типичные для «нормальных» рек значения коэффициентов Шези и Маннинга (соответственно $20\text{--}70\text{ м}^{1/2}/\text{с}$ и $0,02\text{--}0,04$) наблюдаются в обеих реках при более-менее установившемся течении воды в обоих направлениях в прилив и отлив, а их наиболее «нетипичные» значения приурочены к моментам разворота основного течения. Коэффициент гидравлического сопротивления λ изменялся в очень широком диапазоне: от «минус» 6,42 до «плюс» 32,7 для Кянды и от «минус» 6,43 до «плюс» 174 для Тамицы.

Вариации коэффициента гидравлического сопротивления λ в ходе приливного цикла вполне согласуются с представлениями о природе и механизме диссипации кинетической энергии в турбулентных потоках. Коэффициент λ (равно как и коэффициент шероховатости Маннинга) принимает наибольшие значения непосредственно перед разворотом течения, что характеризует интенсивный переход энергии осредненного движения к пульсационному, после чего происходит постепенная «сработка» накопленной энергии и ее обратный переход к осредненному движению.

Данные расчетов вполне согласуются с визуальными наблюдениями за характером течений, так во время выполнения измерений было отчетливо видно, что при развороте основного течения водная

масса не стоит на месте, а представляет собой систему разномасштабных вихрей, хаотично разбросанных и перемещающихся по акватории устьевой области, которые после начала отлива упорядочиваются и формируют течение в сторону моря.

Выводы:

– выполненные полевые исследования в мезоприливных устьевых областях малых рек, характеризующихся сходным режимом стока и характером приливных колебаний уровня моря, однако имеющих различную морфологию речного русла и взморья, позволили установить общие черты и различия в гидродинамике водных потоков:

1) морфология устьевой области, и в первую очередь уклон реки, определяет характер трансформации приливной волны при ее продвижении вверх по руслу реки, а также скорость и дальность ее распространения;

2) максимум уровня водной поверхности в прилив достигается одновременно на всем протяжении устьевого участка реки, также одновременно по длине участка начинается отливное течение, которое происходит без формирования отчетливо выраженной волны излива при практически горизонтальной водной поверхности;

3) при реверсивном движении водных масс по руслу реки гидравлическое сопротивление варьирует в чрезвычайно широких пределах, принимая в некоторые фазы приливного цикла отрицательные значения, что не противоречит современным представлениям о механизме диссипации энергии в турбулентных потоках и согласуется с трактовками понятия «отрицательная турбулентная вязкость»;

– анализ современных экспериментальных исследований в области аэро- и гидродинамики приводит к выводу, что «существование отрицательной вихревой вязкости до сих пор стоит под вопросом, однако на протяжении почти столетия расчеты в проектной практике во всем мире ведутся с его учетом ... Появившиеся в последнее время результаты высокоточных измерений распределения осредненных скоростей в трубах и пограничное на плоской пластине напрямую свидетельствуют в пользу существования слоя с отрицательной вязкостью, что является прямым подтверждением этого факта» [Высоцкий, 2013. С. 52–53];

– исследование отрицательной турбулентной вязкости «в макромасштабе» и отрицательного гидравлического сопротивления в приливных устьях может стать базой не только для уточнения основных параметров в гидравлических расчетах неустановившихся водных потоков, но и привести в перспективе к минимизации затрат энергии на перемещение значительных водных масс при реализации водохозяйственных и водотранспортных проектов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-01018) и РНФ в части полевых работ (проект № 14-17-00155).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алабян А.М., Панченко Е.Д. Гидравлическое сопротивление в приливных устьях и феномен «отрицательного трения» в речной гидравлике // Инженерные изыскания. 2017. № 3. С. 18–26.
- Великанов М.А. Динамика русловых потоков. Т. 1. Структура потока. М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1954. 324 с.
- Высоцкий Л.И. Существуют ли зоны с отрицательной вихревой вязкостью в продольно-однородных турбулентных потоках? // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 2. С. 48–53.
- Дебольский В.К., Зырянов В.Н., Мордасов М.А. О турбулентном обмене в приливном устье при наличии ледяного покрова // Динамика и термика рек и водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 279–290.
- Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. М.: Наука, 1983. 216 с.
- Мискевич И.В., Коробов В.Б., Алабян А.М., Демиденко Н.А., Попрядухин А.А. Исследования короткопериодной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик устья реки Кянда в Онежском заливе Белого моря (28 июля – 15 августа 2016 г.) // Океанология. 2018. № 3.
- Михайлов В.Н. О кинематике потока в устье реки // Тр. ГОИН. 1970. Вып. 98. С. 5–22.
- Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. М.: Наука, 1965. Ч. 1. 640 с.
- Полонский В.Ф., Горелиц О.В. Влияние приливов на скоростную структуру речного потока на примере устья р. Северной Двины // Гидрофизические процессы в реках и водохранилищах. М., 1985. С. 220–227.
- Старр В. Физика явлений с отрицательной вязкостью. М.: Мир, 1971. 261 с.
- Фидман Б.А. Турбулентность водных потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 240 с.
- Форхгеймер Ф. Гидравлика. М.-Л.: ОНТИ, 1935. 616 с.
- Христианович С.А., Михлин С.Г., Девисон Б.Б. Неустойчившееся движение в каналах и реках // Некоторые новые вопросы механики сплошной среды. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1938. С. 15–156.
- Lopez H.M., Gachelin J., Douarche C., Auradou H., Clement E. Turning bacteria suspensions into superfluids // Physical Review Letters. 2015. V. 115(2), 028301. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.028301>.
- Lorenz E.N. Interaction between a mean flow and random disturbances // Tellus. 1953. V. 5. № 3. P. 238–250.
- Savenije H.G. Salinity and tides in alluvial estuaries. Delft University of Technologies, 2012. 163 p.

Поступила в редакцию 29.08.2017

Принята к публикации 12.03.2018

A.M.Alabyan¹, E.D.Panchenko², A.A.Alekseeva³

HYDRODYNAMIC FEATURES OF SMALL TIDAL ESTUARIES OF THE WHITE SEA BASIN

Application of the modern hydrometric and geodetic equipment during field works in small meso-tidal estuaries of the Kyanda and Tamitsa rivers flowing into the Onega Bay of the White Sea made it possible to investigate specific features of tidal waves propagation and dynamics of reversing currents. Variations of hydraulic parameters during a tidal cycle were studied using one-dimensional flow scheme. A paradoxical hydrodynamic phenomenon of negative turbulent viscosity was recorded and its nature is investigated in context of the energy dissipation mechanism in turbulent flows under the cyclic water level fluctuations and reverse currents in tidal estuaries.

Key words: meso-tidal estuary, the Kyanda River, the Tamitsa River, tidal cycle, reversing current, negative turbulent viscosity, hydraulic resistance.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 16-05-01018) and the Russian Science Foundation (field studies, project № 14-17-00155).

REFERENCES

- Alabyan A.M., Panchenko E.D. Gidravlichesкое soprotivlenie v prilivnykh ust'yakh i fenomen «otricaten'nogo treniya» v rechnoi gidravlike [Hydraulic resistance in tidal estuaries and a 'negative friction' phenomenon in river hydraulics] // Inzhenerye isyskaniya. 2017. № 3. P. 18–26 (in Russian).
- Debol'skiy V.K., Zyryanov V.N., Mordasov M.A. O turbulentnom obmene v prilivnom ust'e pri nalichii ledjanogo pokrova [About turbulent exchange in a tidal estuary under the ice cover] // Dinamika i termika rek i vodohranilishh. Moscow: Nauka, 1984. P. 279–290 (in Russian).
- Fidman B.A. Turbulentnost' vodnykh potokov [Turbulence of water flows]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 240 p. (in Russian).
- Forhgeimer F. Gidravlika [Hydraulics]. Moscow-Leningrad: ONTI, 1935. 616 p. (in Russian).
- Khristianovich S.A., Mihlin S.G., Devison B.B. Neustanovivsheesja dvizhenie v kanalah i rekah [Unsteady motion

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Associate Professor, PhD. in Geography; e-mail: andrei_alabyan@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, master's student; e-mail: panchenko.zhe@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, master's student; e-mail: anna-artemovna@yandex.ru

in rivers and canals]. *Nekotorye novye voprosy mehaniki sploshnoj sredy*. Moscow-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1938. P. 15–156 (in Russian).

Kuchment L.S., Demidov V.N., Motovilov Ju.G. Formirovanie rechnogo stoka [River runoff formation]. Moscow: Nauka, 1983. 216 p. (in Russian).

Lorenz E.N. Interaction between a mean flow and random disturbances // *Tellus*. 1953. V. 5. № 3. P. 238–250.

Mikhailov V.N. O kinematike potoka v ust'e reki [About flow kinematics in a river mouth] // *Trudy GOIN*. 1970. V. 98. P. 5–22 (in Russian).

Miskevich I.V., Korobov V.B., Alabyan A.M., Demidenko N.A., Popryadukhin A.A. Issledovaniya korotkoperiodnoj izmenchivosti gidrologo-gidrohimičeskikh harakteristik ust'ja reki Kyanda v Onezhskom zalive Belogo morja (28 iyulya – 15 avgusta 2016 g.) [Study of short-term variability of hydrological and hydrochemical features of the Kyanda River estuary in the Onega Bay of the White Sea (July, 28 – August, 15, 2016)] // *Okeanologiya*. 2017. № 3 (in Russian).

Monin A.S., Yaglom A.M. Statisticheskaja gidromehanika [Statistic hydromechanics]. Part. 1 *Mehanika turbulentnosti*

[Mechanics of turbulence]. Moscow: Nauka, 1965. 640 p. (in Russian).

Polonskij V.F., Gorelic O.V. Vlijanie prilivov na skorostnuju strukturu rechnogo potoka na primere ust'ja r. Severnoj Dviny [Influence of tides on river flow structure (case study of the Northern Dvina River mouth)] // *Gidrofizicheskie processy v rekah i vodohranilishhah*. Moscow, 1985. P. 220–227 (in Russian).

Savenije H.G. Salinity and tides in alluvial estuaries // Delft University of Technologies. 2012. 163 p.

Starr V. Fizika javlenij s otricatel'noj vjazkost'ju [Physics of phenomena with negative viscosity]. Moscow: Mir, 1971. 261 p. (in Russian).

Velikanov M.A. Dinamika ruslovyh potokov [Dynamics of channel flows]. V. 1. Struktura potoka [Flow structure] // M.: Gos. izd-vo tehniko-teoreticheskoy lit-ry, 1954. 324 p. (in Russian).

Vysockiy L.I. Sushhestvujut li zony s otricatel'noj vjhrevoj vjazkost'ju v prodol'no-odnorodnyh turbulentnyh potokah? [Do zones of negative eddy viscosity exist in longitudinally uniform turbulent flows?] // *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*. 2013. № 2. P. 48–53 (in Russian).

Received 29.08.2017

Accepted 12.03.2018