ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ. ПРОБЛЕМЫ ЖКК. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЯ

УДК 532.592.7

DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.4

Деформации мерзлых склонов рек на повороте русла при наличии движущихся судов¹

О.Я. Масликова

Институт водных проблем РАН (ИВП РАН), 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3

АННОТАЦИЯ: навигационный транспорт генерирует определенный вид береговых волн, которые имеют особое влияние на топографические границы водного объекта и локальные гидравлические условия у берега посредством более выраженного по сравнению с ветровыми волнами воздействия. Разрушительная сила судовых волн наиболее полно проявляется на берегах, сложенных рыхлыми песчаными отложениями.

Предмет исследования: закругленные участки русел рек, протекающих в криолитозоне, и такие факторы, влияющие на их размыв, как собственная скорость потока и воздействие судовых волн.

Цели: получение системы уравнений, позволяющих прогнозировать основные факторы разрушения берегов рек в процессе оттаивания породы и в навигационные периоды.

Материалы и методы: для оценки разрушительной силы судовых волн и их воздействия на размыв, были выявлены основные факторы, влияющие на возникновение и распространение судового волнения. Объединены теоретические исследования, касающиеся условий возникновения и распространения судовых волн, в том числе с учетом угла подхода к берегу, исследования существования и сохранения профиля динамического равновесия берега, а также теория транспорта наносов в потоке.

Результаты и выводы: в комплексе с полученными ранее уравнениями размыва мерзлых берегов предложена модель, объединяющая воздействие потока на закругленные берега, в том числе в процессе оттаивания породы, а также при воздействии судовых волн в зависимости от параметров движения судна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геофизика, прибрежная зона, судовые волны, русловые процессы, физические процессы, деформации профиля дна, мерзлый грунт, протаивание, эрозия почв, водный поток, поворот русла

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Масликова О.Я. Деформации мерзлых склонов рек на повороте русла при наличии движущихся судов // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 3. Ст. 4. DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.4

Deformations of frozen river slopes at the ancon in the presence of moving vessels²

Oksana Ya. Maslikova

*Institute of Water Problems Russian Academy of Sciences (IWP RAS),
3 Gubkina st., Moscow, 119333, Russian Federation*

ABSTRACT: navigation transport generates a specific type of coastal waves, which have a particular impact on the topographic boundaries of the water body and local hydraulic conditions along the bank by means of a more pronounced impact in comparison with wind waves. The destructive power of ship waves is most fully manifested on the banks, composed of loose sandy deposits.

Scope of research: ancons flowing in the cryolithic zone and such factors influencing erosion, as the river flow rates and impact of ship waves.

Purposes: obtaining a system of equations for predicting the main factors of the destruction of river banks during the thawing of rocks and in navigation periods.

Materials and methods: to assess the destructive force of ship waves and their impact on erosion, the main factors affecting the occurrence and spread of ship waves were identified. Theoretical studies concerning the conditions of occurrence and propagation of ship waves, including taking into account the inflow angle to the bank, studies of the existence and preservation of the profile of the dynamic equilibrium of the bank, as well as the theory of sediment transport in the stream are combined.

Results and Conclusions: in combination with the previously obtained equations of erosion of frozen banks, a model is proposed that combines the effect of flow on rounded banks, including during the thawing of the rock, as well as under the influence of ship waves, depending on the parameters of the ship's movement.

KEY WORDS: geophysics, coastal zone, ship waves, channel processes, physical processes, deformation of the bottom profile, frozen soil, thawing, soil erosion, water flow, channel turn

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 16-08-00595, № 18-05-00178.

² The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects No. 16-08-00595, No. 18-05-00178.

FOR CITATION: Maslikova O.Ya. Deformatsii merzlykh sklonov rek na povorote rusla pri nalichii dvizhushchikhsya sudov [Deformations of frozen river slopes at the ancon in the presence of moving vessels]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2018, vol. 8, issue 3, paper 4. (In Russian) DOI: 10.22227/2305-5502.2018.3.4

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших вопросов речной гидравлики является движение воды и формирование русла в потоке, имеющем непрямолинейное очертание в плане. В естественных условиях для рек характерно извилистое очертание в плане, причем у некоторых рек или их участков, которые принято называть меандрирующими, эта извилистость чрезвычайно велика. Искривление струи имеет место и при делении потока на рукава, при впадении притока в реку, слиянии потоков и т.п. Поэтому изучение русловых процессов в реках невозможно без знания закономерностей течения на закруглении русла.

Судовые волны, подходя к берегам, разрушают их. При малых запасах воды под днищем в результате работы движителей дно размывается (поэтому скорость на каналах ограничивается). При приближении к отлому берега судна, идущего полным ходом, уровень воды возле берега заметно повышается. Как только судно поравняется с берегом, начнутся отлив воды и резкое понижение ее уровня. После того как судно пройдет мимо, на берег вкатывается большая судовая волна, иногда с пенистым гребнем, что может вызвать большие разрушения. При подходе одиночного судна по течению или судна с составом влияние судовых волн на берега и стоящие суда оказывается несколько меньшим. Чтобы оценить разрушительную силу судовых волн и их воздействие на береговой размыв, надо выявить основные факторы, влияющие на возникновение и распространение судового волнения.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

И.Л. Розовский [1] обозначил пять характерных особенностей потока на повороте русла:

1. Возникновение поперечного уклона водной поверхности: у выпуклого берега уровень ее понижается, у вогнутого — повышается.

2. Движение поверхностных струй к вогнутому, придонных — к выпуклому берегу как следствие поперечного уклона: на основной поток накладывается вращение винтового характера, называемое поперечной циркуляцией.

3. Перераспределение скоростей течения как по вертикали, так и по ширине потока благодаря наличию поперечного уклона. В результате в начале закругления происходит увеличение скоростей у выпуклого берега и уменьшение их у вогнутого,

ниже по течению максимум скорости постепенно передвигается к вогнутому берегу закругления.

4. Явление отжима (отрыва) потока от стенок и образование водоворотных зон при очень резком плановом искривлении.

5. Наличие дополнительных потерь энергии потока на закруглении, вызываемых увеличением неравномерности скоростей по живому сечению, удлинением пути отдельных частиц благодаря винтовому характеру движения, усилению обмена количеством движения между отдельными струйками.

Среди криогенных факторов, влияющих на процесс переформирования берегов водоемов в криолитозоне, обычно называют продолжительность безледного периода, снежные надувы у берегов и мерзлое состояние грунтов. Долго считалось, что мерзлота замедляет размыв берегов, но было показано, что оттаивающий мерзлый грунт меняет прочностные характеристики и сопротивляемость размыву. Характер размыва определяется соотношением скоростей протаивания и сноса грунта [2]. Это также было подтверждено Ф.Э. Арэ, который на фактах показал, что сильнольдистые термоабразионные берега могут иметь в 3–4 раза большую скорость отступления, чем абразионные берега.

Термоабразионные ниши — форма мезорельефа берегов криолитозоны. Размеры ниш зависят от энергии волнения (течения), рельефа подводного склона, свойств грунта, высоты берега и изменчивости уровня воды. Цикл развития термоабразионных берегов состоит из трех фаз: выработка ниши, обрушение блоков грунта и переработка их волнами и течением. Лежащие на урезе блоки грунта защищают берег от воздействия волн, поэтому скорость отступления бровки берега всегда меньше скорости размыва ниш.

Различные соотношения скоростей процессов термоабразии в затапливаемой части берега и термоденудации — в надводной части, приводят к реализации четырех основных типов термоабразионных берегов. Наклонные уступы разрушаются за счет термоденудации. У наклонных уступов со срезанной нижней частью скорости формирования ниши и выколаживания уступа сопоставимы. При дальнейшем усилении термоабразии берег становится отвесным. Мерзлое состояние грунтов влияет на процесс размыва неоднозначно.

Влияние судовых волн на прямолинейный берег рассматривалось различными авторами в связи с решением проблем гидротехнического строитель-

ства и берегоукрепления. Большая работа представлена в издании [3], где используя геометрические аргументы, нелинейный анализ и компьютерное моделирование автор определяет линейные и нелинейные особенности в волновой спектрограмме судна. В исследовании [4] использовался метод спектрограмм для определения дополнительных компонент судовых волн, которые не были описаны ранее. Оптический метод на основе лазерных лучей применялся для определения поля скоростей волн, исходящих от судна, на основе сравнения со свободной поверхностью [5]. Влияние формы судна, в частности переднего выступа (носа), при прочих равных параметрах описано в статье [6]. Влияние параметров потока с учетом критической скорости в русле с конечной глубиной на распространение судовых волн описано в труде [7]. Нестационарность движения судна на свободной поверхности потока подробно представлена при помощи математической модели [8]. При расчете корабельного следа многими авторами использовались точные математические методы (например, метод асимптотических приближений) [9] и эффекты волновой интерференции на дальнем расстоянии от источника волн на примере катамаранов [10, 11]. Дополняют эти результаты работы [12, 13].

Комплексная теория линейных гравитационных судовых волн при наличии тока сдвига с равномерной завихренностью, включая эффекты конечной глубины воды, представлена в публикации [14]. Здесь применялось введение конечной глубины воды, что физически нетривиально, а также рассматривались явления критической скорости, скорости, с которой трансверсально распространяющиеся волны не могут не отставать от движущегося источника. Это явление наблюдается в мелкой воде, недавно было установлено, что оно также существует и в глубокой воде при наличии тока сдвига [15].

Авторами [16] предложен метод решения задачи о возбуждении корабельных волн невязкой

жидкости погруженным объектом, который движется с переменной скоростью, получены асимптотические выражения, описывающие вертикальное смещение поверхности жидкости в пределе малых и больших значений числа Фруда. Проведено их сравнение с полученным нами точным решением, которое представлено в виде двух слагаемых, каждое из которых приведено к одномерному интегралу.

Некоторые работы, связанные с безопасностью подводных трубопроводов и плотин, посвящены влиянию судовых волн на дно [17].

Движение судна с постоянной скоростью при наличии волн на поверхности потока решено в исследовании [18] при помощи программы Fortran. Учитывая существенное воздействие этих волн и скорости потока на движение судна, были рассмотрены две модели для случаев стационарного и нестационарного течения. Показана зависимость рассчитанных результатов движений корабля от условий свободной поверхности за счет различных моделей стационарного потока.

Как известно, от носа и кормы образуются самостоятельные волновые системы, которые интерферируют друг с другом [19]. В указанном научном труде геометрически показано, что волны чувствительной (интерферирующей друг с другом амплитуды) будут образовываться только в угле раствором $38^{\circ}56'$, биссектрисой которого является ось движения судна. Значит, в обе стороны и к берегу волны будут распространяться под углом $19^{\circ}28'$. На рис. 1 показано, что через любую точку внутри этого раствора проходят два вида кривых одинаковой фазы.

Подходя к берегу, судовые волны генерируют вдольбереговые течения. Вдольбереговые течения условно подразделяются на энергетические, генерируемые при косом подходе волн, и градиентные, обусловленные изменениями среднего уровня [20]. При наблюдениях в природных условиях бывает довольно трудно идентифицировать тот или иной

Рис. 1. Волны судовые: 1 — расходящиеся; 2 — поперечные

вид течений, поскольку все они, как правило, действуют одновременно. На участках, где направления энергетического и градиентного течений совпадают, скорость максимальна, а там, где они противоположны — минимальна. Если β_x и β_y — характерные уклоны дна по нормали и вдоль берега, а φ — угол подхода волн, то, как показано И.О. Леонтьевым [21], энергетическое течение доминирует над градиентным при условии

$$\sin \varphi > \frac{1}{2} \frac{\beta_x}{\beta_y}.$$

Вдольбереговое энергетическое течение, генерируемое косоподходящим волнением, служит одним из важнейших механизмов адвекции растворенного и взвешенного вещества в прибрежной зоне и играет главную роль в формировании потока наносов вдоль берега. Протяженность течения зависит от характера контура береговой линии, ширина определяется масштабом ширины прибойной зоны, в которой течение зарождается и откуда оно диффундирует в соседние области.

М.С. Лонге-Хиггинс [22] нашел теоретическое распределение скоростей течения для регулярных волн, распространяющихся под небольшим углом к берегу на мелкой воде над плоским наклонным дном. Коэффициент горизонтального обмена (вихревой вязкости) в прибойной зоне с монотонно повышающимся дном определялся с помощью соотношения $\nu_l \sim gHT$, где H и T — высота и период волн.

Масштаб скорости на линии обрушения при подходе волн под углом φ [20]:

$$V_0 = \frac{5\pi}{16} \gamma_B \frac{\beta}{C_f} \sqrt{gh} \sin \varphi,$$

где C_f — коэффициент трения; $\gamma_B = \frac{H}{h}$; h — полная глубина, включающая и отклонение среднего уровня от штилевой отметки; β — коэффициент порядка единицы.

Соотношение показывает, что скорость течения прямо пропорциональна уклону дна, определяющему скорость диссипации, синусу угла подхода волн и квадратному корню из глубины обрушения, зависящей в основном от исходной высоты волн.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические исследования

Ранее [23] была получена формула для транспортирующей способности водного потока с учетом изменения льдистости:

$$S = 2,4 \cdot 10^{-9} \frac{U^3}{ghw(i^2 + 10^{-6})}, \quad (1)$$

где S — транспортирующая способность потока; U — средняя скорость потока; h — глубина потока; w — гидравлическая крупность незамерзшего мате-

риала; i — льдистость за счет ледяных включений в долях единицы (д.е.).

Скорости противотечения, действующие на откосе при глубине h , определяются соотношением:

$$U = \frac{5\pi^2 H^2}{4TLsh^2 kh} \sin \varphi, \quad (2)$$

где H — высота волн; L — длина наката волны.

Рис. 2. Направления результирующих векторов скорости потока на закруглении

Рис. 3. Линии тока (одинаковых скоростей) в потоке на закруглении

Поворот вызывает перераспределение скоростей по ширине и вертикалям живого сечения. На рис. 2 и 3 показано направление векторов скорости и линий тока на закруглении, полученное в программе FemLab. Анализ показывает [1], что в результате появления поперечного уклона поверхности воды в начале закругления максимум скорости перемещается к внутреннему, выпуклому берегу. В общем случае распределение скоростей по ширине (в цилиндрических координатах) при входе в закругление, очерченное по дуге круга, выражается формулой

$$v_\Theta \frac{1}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr + c}, \quad (3)$$

где v_Θ — соответствующая ей скорость на закруглении; Θ — угол, отсчитываемый от начала закругле-

ния; r — большой радиус; v_0 — средняя по вертикали скорость перед закруглением.

Постоянную величину c можно определить из условия неразрывности, т.е. из равенства расходов Q жидкости перед закруглением и на нем:

$$Q = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{нар}}} v_0 h dr = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{нар}}} \frac{h}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr + c}, \quad (4)$$

где $r_{\text{вн}}$ и $r_{\text{нар}}$ — радиусы соответственно выпуклого и вогнутого берегов; h — глубина по вертикали.

В самом закруглении, благодаря вызванному поперечной циркуляцией обмену количеством движения, между плановыми струями потока происходит перераспределение скоростей, и максимум скорости постепенно перемещается к наружному вогнутому берегу. При выходе из закругления, где центробежная сила и поперечный уклон уже не действуют, вертикаль с максимумом скорости оказывается на значительном протяжении у самого продолжения вогнутого берега.

Подставляя эти скорости в уравнение Дебольского для размыва [24], переписанное с учетом льдистости для криолитозоны (1), можно получить величины размыва для вогнутого $S_{\text{нар}}$ и выпуклого $S_{\text{вн}}$ берега. С учетом поперечной циркуляции и донного переноса наносов от внешнего к внутреннему берегу, можно в общем для участка считать $S_{\text{нар}}$ по формуле (2), а в случае внутреннего берега к размыву $S_{\text{вн}}$ прибавлять намыв с противоположного берега $S_{\text{нар}}$ с учетом сдвижки по течению, равной средней скорости потока на закруглении.

Судовые волны

В работе [19] было доказано, что скорость распространения образующихся при движении корабля поперечных волн равна скорости самого корабля. Посчитаем скорость распространения V диагональных (расходящихся) волн (рис. 4). Y-компонента этих волн будет равна V_c — скорости судна. X-компонента диагональной волны в момент возникновения равна соответственно

$$V_{cx0} = V_c \operatorname{tg} 19^\circ 28' = 0,35 V_c.$$

При подходе к берегу эта компонента будет изменяться с изменением скорости течения реки.

Согласно авторам [19]:

$$r = \frac{1}{2} V_c t \cos \theta,$$

где V_c — скорость судна; t — текущее время; r — путь, пройденный волной от судна до точки интерференции на берегу; $y = r \sin \theta$ — расстояние от судна до берега (или половина ширины канала), или $\frac{y}{\sin \theta} = \frac{1}{2} ct \cos \theta$, откуда угол, под которым распространяются судовые волны в момент возникновения:

Рис. 4. Распространение диагональных волн

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4y}{ct} \right) \quad (5)$$

Область допустимых значений арксинуса: $-1 \leq \frac{4y}{ct} \leq 1$, или $t \geq \frac{4y}{c}$. Именно начиная с этого времени (не раньше) волны от судна начинают достигать берега.

Определим поверхностную скорость течения реки в виде:

$$U = U_{\text{реки}} \sqrt[3]{1 - \left(\frac{y}{y_{\text{max}}} \right)^3}, \quad (6)$$

где U — максимальная скорость течения реки; y_{max} — расстояние от стрежня до берега. Линия стрежня совпадает с траекторией судна.

Координату $y' = \frac{h}{\tan i}$ начала обрушения волн определим из [20] $\gamma_B = \frac{H_{sh}}{h} = 0,8$

$$y' = \frac{H_{sh}}{0,8 \tan i}, \quad (7)$$

где H_{sh} — высота подходящих волн, в нашем случае судовых; i — береговой уклон.

Значит, X-компонента пришедшей к берегу диагональной волны будет $V_{cx} = V_{cx0} + U(y')$, Y-компонента останется неизменной или равной скорости судна. Таким образом, в зависимости от взаимного направления течения и движения судна, X-компонента рассчитывается как:

$$V_{cx} = 0,35 V_c \pm U(y'), \quad (8)$$

угол подхода волн к прибойной зоне:

$$\tan \varphi = \frac{V_{cx}}{V_c}. \quad (9)$$

В случае закругленного участка реки угол подхода судовых волн определяется из теоремы синусов: стороны треугольника пропорциональны синусам противолежащих углов. В нашем случае стороны — радиус кривизны внешнего, вогнутого берега R_{out} и радиус кривизны траектории судна R_c (см. рис. 5):

$$\frac{R_{\text{out}}}{\sin(90 + 19^\circ 28')} = \frac{R_c}{\sin}, \quad (10)$$

$$\text{отсюда } \sin = \frac{R_c}{R_{out}} \sin(90 + 19^\circ 28') = 0,94 \frac{R_c}{R_{out}}.$$

Рис. 5. Расчет угла подхода судовых волн к закругленному берегу

Из рис. 5 видно, что внешний берег подвержен воздействию судовых волн практически в любом случае, в то время как к внутреннему берегу волны подходят фронтально, но с запозданием, потеряв часть энергии на своем пути.

Система уравнений (5)–(10) полностью описывает расчет угла подхода судовых волн к берегу, который зависит от уклона дна в прибойной зоне, ширины реки, скорости течения реки и скорости судна. При приближении к берегу X-компонента скорости диагональной волны уменьшается вместе с поверхностным течением при неизменной Y-компоненте, что изменяет угол подхода волны. На широких реках этот угол меньше, чем на узких. Данный параметр является важным для расчета динамики берегового профиля равновесия.

Таким образом, получена система уравнений (1)–(10) для расчета скорости размыва берегов

вследствие движения потока и волнения, создаваемого судами, на повороте русла, а именно:

1. Количество размываемого материала находится из формулы (1).

2. Распределение скоростей при входе в закругление выражается формулой (3).

3. Масштаб скорости на линии обрушения при подходе судовых волн под углом φ определяется из (2).

4. Из области допустимых значений для (5) определяется время начала воздействия судовых волн на берег.

5. Координата начала обрушения подходящих к берегу волн — (7), подставляя ее в (6), находим скорость основного течения в данной точке, отсюда из (8) находим X-компоненту подходящей судовой волны и из (9) — угол подхода волн в случае прямолинейного русла.

В случае закругленного русла угол подхода судовых волн определяется из (10).

ВЫВОДЫ

1. Размыв берегов в криолитозоне происходит вследствие движения собственно потока и волнения, создаваемого судами.

2. Получена система уравнений для расчета скорости размыва вогнутого берега и размыва плюс намыва противоположного, выпуклого.

3. Судовые волны воздействуют на внешний берег практически в любом случае прохождения судна, в то время как к внутреннему берегу волны подходят фронтально, но с запозданием, потеряв часть энергии на своем пути.

4. В комплексе с полученными ранее уравнениями размыва мерзлых берегов предложена модель, объединяющая воздействие потока на закругленные берега, в том числе в процессе оттаивания породы, а также при воздействии судовых волн в зависимости от параметров движения судна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. Киев : АН УССР, 1957. 188 с.
2. Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ионов Д.Н., Грицук И.И., Джумагулова Н.Т. Лабораторное исследование влияния потока на протаивание подводного склона и темпы береговой эрозии в условиях криолитозоны // Вестник РУДН. Сер. : Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 2. С. 182–191. DOI: 10.22363/2312-8143-2017-18-2-182-191.
3. Pethiyagoda R. Mathematical and computational analysis of Kelvin ship wave patterns // Submitted in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy. Queensland University of Technology,

2016, 52 p. URL: https://eprints.qut.edu.au/101167/1/Ravindra_Pethiyagoda_Thesis.pdf.

4. Pethiyagoda R., McCue S.W., Moroney T.J. Spectrograms of ship wakes: identifying linear and nonlinear wave signals // Journal of Fluid Mechanics. 2017. Vol. 811. Issue 1. Pp. 189–209.

5. Gomit G., Chatellier L., Calluau D., David L., Frchou D., Boucheron R. et al. Large scale free surface measurement for the analysis of ship waves in a towing tank // Experiments in Fluids. 2015. Vol. 56. Issue 10. Pp. 1–13. DOI: 10.1007/s00348-015-2054-z.

6. Abdeljalil Benmansour, Benameur Hamoudi, Lahouari Adjilout. Effect of ship bow overhang on

water shipping for ship advancing in regular head waves // *Journal of Marine Science and Application*. 2016. Vol. 15. Issue 1. Pp. 33–40. DOI: 10.1007/s11804-016-1345-y.

7. Pethiyagoda R., Moroney T.J., MacFarlane G.J., Binns J.R., McCue S.W. Time-frequency analysis of ship wave patterns in shallow water: modelling and experiments // *Ocean Engineering*. 2017. Vol. 158. Pp. 123–131. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.108.

8. Hariharan G., Sathiyaseelan D. Efficient spectral methods for a class of unsteady-state free-surface ship models using wavelets // *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2017. Vol. 68. Issue 2. Pp. 1–15. DOI: 10.1007/s00033-017-0777-9.

9. Wu H., He J., Zhu Y., Noblesse F. The Kelvin-Havelock-Peters farfield approximation to ship waves // *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2018. Vol. 70. Pp. 93–101. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2018.03.004.

10. He J., Zhang C., Zhu Y., Zou L., Li W., Noblesse F. Interference effects on the Kelvin wake of a catamaran represented via a hull-surface distribution of sources // *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2016. Vol. 56. Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2015.10.009.

11. Zhang C., He J., Zhu Y., Yang C.-J., Li W., Zhu Y. *et al.* Interference effects on the Kelvin wake of a monohull ship represented via a continuous distribution of sources // *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2015. Vol. 51. Pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2014.12.006.

12. Ma C., Zhu Y., Wu H., He J., Zhang C., Li W. *et al.* Wavelengths of the highest waves created by fast monohull ships or catamarans // *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 113. Pp. 208–214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.042.

13. Zhu Y., Ma C., Wu H., He J., Zhang C., Li W. *et al.* Farfield waves created by a catamaran in shallow water // *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2016. Vol. 59. Pp. 197–204. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2016.06.003.

14. Li Y., Ellingsen S.Å. Ship waves on uniform shear current at finite depth: wave resistance and critical

velocity // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 791. Pp. 539–567. DOI: 10.1017/jfm.2016.20.

15. Ellingsen S.Å. Ship waves in the presence of uniform vorticity // *Journal of Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 742. DOI: 10.1017/jfm.2014.28.

16. Arzhannikov A.V., Kotelnikov I.A. Excitation of ship waves by a submerged object: New solution to the classical problem // *Physical Review E*. 2016. Vol. 94. Issue 2. DOI: 10.1103/physreve.94.023103.

17. Yu Z., Amdahl J. A review of structural responses and design of offshore tubular structures subjected to ship impacts // *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 154. Pp. 177–203. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.02.009.

18. Chen X., Zhu R., Zhao J., Zhou W., Fan J. Study on weakly nonlinear motions of ship advancing in waves and influences of steady ship wave // *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 150. Pp. 243–257. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.053.

19. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 1 / под ред. И.А. Кибеля. 6-е изд., испр. и доп. М.: Физматлит, 1963. 583 с.

20. Динамические процессы береговой зоны моря / под ред. Р.Д. Косьяна, И.С. Подымова, Н.В. Пыхова. М.: Научный мир, 2003. 320 с.

21. Леонтьев И.О. Динамика прибойной зоны. М.: АН СССР, Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова, 1989. 184 с.

22. Longuet-Higgins M.S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 2 // *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75. Issue 33. Pp. 6790–6801. DOI: 10.1029/jc075i033p06790.

23. Грицук И.И., Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К. Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород // *Лед и снег*. 2012. Т. 52. № 3. С. 73–78. DOI: 10.15356/2076-6734-2012-3-73-78.

24. Дебольский В.К., Зайдлер Р., Массель С. и др. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М.: Наука, 1994. 302 с.

Поступила в редакцию 25 июня 2018 г.

Принята в доработанном виде 30 июля 2018 г.

Одобрена для публикации 29 августа 2018 г.

ОБ АВТОРЕ: Масликова Оксана Яковлевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт водных проблем РАН (ИВП РАН), 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, oksana68@mail.ru.

INTRODUCTION

One of the most important issues of river hydraulics is the movement of water and the formation of the channel in the stream, which has an out-of-line basic geometry in plan. In natural conditions, the rivers are characterized by a tortuous geometry in plan, and in some rivers or their areas, which are usually called meandering, this tortuosity is extremely large. Jet deflection also occurs when the flow is divided into sleeves, when inflow flows into the river, when streams merge, etc. Therefore, the study of river bed evolution is impossible without knowledge of the laws of flow on the ancons.

Ship waves approaching the bank, destroy them. At low water reserves underneath the result of the work of propelling the bottom is blurred (so the speed on the canals is limited). When approaching the sloping bank of the vessel, coming at full speed, the water level near the bank rises markedly. As soon as the ship is level with the bank, the water discharge and sharp decrease in its level begin. After the ship has passed by, a large ship's wave rolls onto the bank, sometimes with a foamy crest, which can cause great damage. With the approach of a single vessel downstream or a vessel with a composition, the influence of ship waves on the bank and standing vessels is somewhat less. To assess the destructive power of ship waves and their impact on stream bank erosion, it is necessary to identify the main factors affecting the occurrence and spread of ship waves.

Background Paper

I.L. Rozovsky [1] identified five characteristic features of the flow at the turn of the channel:

1. The appearance of a transverse slope of the water surface: at the convex bank its level decreases, while at the concave bank — increases.
2. The movement of surface jets to the concave bank, supra-bottom waters — to the convex bank as an effect of the transverse slope: the rotation of the helical character, called transverse circulation, is superimposed on the main stream.
3. Redistribution of river flow rate both vertically and along the flow width due to the presence of a transverse slope. As a result, at the beginning of the ancon, there is an increase in the flow rates at the convex bank and a decrease at the concave, downstream maximum speed gradually moves to the concave bank of the ancon.
4. The phenomenon of separation of the flow from the walls and the formation of eddy zones with a very sharp planned curvature.
5. The presence of additional losses of the flow energy at the ancon caused by the increase in the non-

uniformity of flow rates along the river cross-section, the elongation of the path of individual particles due to the helicoidal nature of the motion, and the increase in the exchange of momentum between the individual jets.

Among the cryogenic factors affecting the process of reshaping the banks of water bodies in the cryolithozone, usually referred to as the duration of the ice-free period, snow blowing off the bank and the frozen state of the soil. It was long believed that the permafrost slows the erosion of the banks, but it was shown that the thawing frozen soil changes the strength characteristics and resistance to erosion. The character of erosion is determined by the ratio of thawing and demolition rates [2]. This was also confirmed by F.E. Are, who on the facts showed that the strongly ice-cold thermoabrasive banks can have 3–4 times greater retreat rate than the abrasion banks.

Thermoabrasive notches are a form of mesorelief of the banks of the permafrost zone. The size of the notches depends on the energy of the wave (flow), the relief of the underwater slope, soil properties, the height of the bank and the variability of the water level. The cycle of development of thermoabrasive banks consists of three phases: the production of a notch, the collapse of soil blocks and their processing by waves and flow. Soil blocks on the ground protect the bank from the effects of waves, so the speed of the retreat of the edge of the bank is always less than the rate of erosion of the notches.

Different ratios of the rates of thermal abrasion processes in the flooded part of the bank and thermodenudation — in the above-water part, lead to the realization of four main types of thermoabrasive banks. The inclined ledges are destroyed by thermodenudation. At the inclined ledges with the cut off bottom part of the speed of formation of the notch and flattening of the ledge are comparable. The bank becomes steep with further strengthening of thermal abrasion. The frozen state of soils affects the erosion process ambiguously.

The influence of ship waves on the rectilinear coast was considered by various authors in connection with the solution of the problems of hydraulic engineering construction and bank protection. Significant study is presented in the publication [3], where using geometric arguments, nonlinear analysis and computer modeling, the author determines the linear and nonlinear features in the wave spectrogram of the vessel. The study [4] used the method of spectrograms to determine additional components of ship's waves, which were not described earlier. An optical method based on laser beams was used to determine the velocity field of waves emanating from a vessel, based on comparison with a free surface [5]. Influence of the shape of the vessel, in particular, the front projection (nose) with other equal pa-

rameters is described in the article [6]. The effect of the flow parameters taking into account the critical velocity in the channel with a finite depth on the propagation of ship waves is described in the paper [7]. The unsteadiness of the vessel's motion on the free flow surface is presented in detail using a mathematical model [8]. When calculating the ship's trace, many authors used exact mathematical methods (for example, the method of asymptotic approximations) [9] and effects of wave interference at a long distance from the source of waves using the example of catamarans [10, 11]. The works [12, 13] supplement these results.

The complex theory of linear gravitational ship waves in the presence of shift current with uniform vorticity, including the effects of finite water depth, is presented in the publication [14]. Here, the introduction of a finite depth of water was used, which is physically nontrivial. The phenomena of the critical speed were considered — the speed at which transversally propagating waves can not keep up with a moving source. This phenomenon is observed in shallow water. It has recently been established that it also exists in deep water in the presence of shift current [15].

The authors of [16] proposed a method for solving the problem of excitation of ship waves of an inviscid fluid by an immersed object that moves at a variable speed, asymptotic expressions describing the vertical displacement of the liquid surface in the limit of small and large values of the Froude number are obtained. The comparison with the obtained exact solution is carried out, which is presented in the form of two summands, each of which is reduced to a one-dimensional integral.

Some works related to the safety of underwater pipelines and dams are devoted to the influence of ship waves on the bottom [17].

The motion of the vessel at a constant speed in the presence of waves on the surface of the flow is decided in the study [18] using the Fortran program. The numerical results of the ship motion depend both on differ-

ent free surface conditions due to different steady-state flow models.

As is known, independent wave systems are formed from the nose and stern, which interfere with each other [19]. In this scientific work, it is geometrically shown that waves of a sensitive amplitude interfering with each other will form only in an angle of $38^\circ 56'$, the bisector of which is the axis of the vessel's motion. Hence, on both sides and to the bank waves will spread at an angle of $19^\circ 28'$. In Fig. 1 it is shown that two kinds of curves of the same phase pass through any point inside this solution.

Approaching the bank, ship waves generate longshore flows. Longshore flows are conventionally divided into energy, generated by the oblique approach of waves; and gradient, due to changes in the average level [20]. When observing in natural conditions, it is quite difficult to identify a particular type of flows, since they all tend to act simultaneously. In areas where the directions of the energy and gradient flows coincide, the velocity is maximal, and where they are opposite, it is minimal. If β_x and β_y — are the characteristic slopes of the bottom along the normal and along the bank, but φ — angle of wave approach, as shown By I.O. Leontiev [21], the energy flow dominates over the gradient flow under the condition

$$\sin \varphi > \frac{1}{2} \frac{\beta_x}{\beta_y}.$$

The longshore energy flow generated by the stray wave is one of the most important mechanisms for the advection of dissolved and suspended matter in the coastal zone and plays a major role in the formation of sediment flow along the bank. The length of the flow depends on the nature of the contour of the coastline, the width is determined by the scale of the width of the surf zone, in which the flow is born and where it diffuses into neighboring areas.

M.S. Longuet-Higgins [22] found a theoretical distribution of flow velocities for regular waves propagat-

Fig. 1. Ship waves: 1 — divergent; 2 — transverse

ing at a small angle to the bank in shallow water above a flat inclined bottom. The coefficient of horizontal exchange (vortex viscosity) in the surf zone with a monotonically increasing bottom was determined using the relation $v_l \sim gHT$, where H and T – are the height and period of waves.

Velocity scale on the collapse line at the approach of waves at an angle φ [20]:

$$V_0 = \frac{5\pi}{16} \gamma_B \frac{\beta}{C_f} \sqrt{gh} \sin \varphi,$$

where C_f — constant of friction; $\gamma_B = \frac{H}{h}$; h — total depth, including and deviation of the average level from the calm mark; β — coefficient of unit ratio.

The ratio shows that the velocity of the flow is directly proportional to the slope of the bottom, which determines the dissipation rate, the sine of the angle of approach of the waves and the square root of the depth of the collapse, which depends mainly on the initial wave height.

MATERIALS AND METHODS

Theoretical investigation

Previously [23], a formula for the transporting capacity of the water flow was obtained taking into account the change in ice content:

$$S = 2,4 \cdot 10^{-9} \frac{U^3}{ghw(i^2 + 10^{-6})}, \quad (1)$$

where S — transport capacity; U — stream average velocity; h — flow depth; w — hydraulic size of the unfrozen material; i — Ice content due to ice inclusions in unit fraction (uf).

The counterflow rates acting on the slope at a depth h are determined by the relation:

$$U = \frac{5\pi^2 H^2}{4TLsh^2 kh} \sin \varphi, \quad (2)$$

where H — wave height; L — length of the wave.

Fig. 2. The directions of the resulting flow rate vectors on the ancon

Fig. 3. Current lines (of the same velocity) in the flow on the ancon

The rotation causes a redistribution of flow rates along the width and verticals of the flow section. Figures 2 and 3 show the direction of the velocity vectors and the current lines on the ancon obtained in the Femlab program. The analysis shows [1] that as a result of the appearance of a transverse slope of the water surface at the beginning of the ancon, the maximum speed moves to the inner convex bank. In general, the distribution of flow rates across the width (in cylindrical coordinates) at the entrance to the ancon, outlined in the arc of the circle, is expressed by the formula

$$v_\Theta \frac{1}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr + c}, \quad (3)$$

where v_Θ — the corresponding speed at the ancon; Θ — angle from the beginning of the ancon; r — the larger radius; v_0 — vertical average speed before the ancon.

The constant value of c can be determined from the continuity condition, i.e. from the equality of the costs Q of the liquid before rounding and on it:

$$Q = \int_{r_{external}}^{r_{outer}} v_0 h dr = \int_{r_{external}}^{r_{outer}} \frac{h}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr + c} dr + A, \quad (4)$$

where $r_{external}$ и r_{outer} — radii of convex and concave banks respectively; h — vertical depth.

In the ancon due to the cross-circulation caused by the exchange of the amount of movement between the planned flow jets, there is a redistribution of speeds, and the maximum speed gradually moves to the outer concave bank. At the exit from the ancon, where the centrifugal force and the transverse slope are no longer valid, the vertical with the maximum speed is at a considerable length at the very continuation of the concave bank.

Substituting these velocities into the Debolsky equation for erosion [24], rewritten in view of the ice content for the cryolithozone (1), it is possible to obtain erosion values for a concave Souter and a convex S_i bank. Taking into account the transverse circulation and bottom sediment transport from the outer to the inner

bank, It is possible in general for the site to consider S_{outer} according to the formula (2), and in the case of the inner bank to erosion $S_{external}$ add alluvium from the opposite bank of the S_{outer} with the flow shift equal to the average flow rate at the ancon.

Ship waves

In the work [19] it was proved that the flow rate of the transverse waves formed during the motion of the ship is equal to the velocity of the ship itself. Calculate the velocity of propagation of V diagonal (divergent) waves (Fig. 4). The Y-component of these waves will be equal to V ship speed. The X-component of the diagonal wave at the moment of occurrence is equal, respectively $V_{cx0} = V_c \operatorname{tg} 19^\circ 28' = 0,35 V_c$. When approaching the bank, this component will change with the change in the speed of the river.

Fig. 4. Propagation of diagonal waves

According to the authors [19]:

$$r = \frac{1}{2} V_c t \cos \theta,$$

where V_c — ship speed; t — current time; r — the path traversed by the wave from the ship to the point of interference on the bank; $y = r \sin \theta$ — the distance from the ship to the bank (or half the width of the channel), or $\frac{y}{\sin \theta} = \frac{1}{2} c t \cos \theta$, where the angle at which the ship waves propagate at the time of occurrence:

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4y}{ct} \right). \quad (5)$$

Area of possible values of arcsine: $-1 \leq \frac{4y}{ct} \leq 1$, или $t \geq \frac{4y}{c}$. From this time (not before) waves from the ship begin to reach the bank.

Determine the surface speed of the river flow in the form of:

$$U = U_{river} \sqrt[3]{1 - \left(\frac{y}{y_{max}} \right)^3}, \quad (6)$$

Here U is the maximum flow rate of the river; y_{max} — distance from the rod to the bank. The line of the rod coincides with the path of the vessel.

The coordinate $y' = \frac{h}{\tan i}$ of the beginning of wave collapse is determined from [20]

$$\gamma_B = \frac{H_{sh}}{h} = 0,8$$

$$y' = \frac{H_{sh}}{0,8 \tan i}, \quad (7)$$

where H_{sh} — height of suitable waves, in our case — ship's; i — bank slope.

Hence, the X-component of the diagonal wave coming to bank will be $V_{cx} = V_{cx0} + U(y')$. The Y-component will remain unchanged, or equal to the speed of the ship. Thus, depending on the mutual direction of flow and movement of the vessel, the X-component is calculated as:

$$V_{cx} = 0,35 V_c \pm U(y'), \quad (8)$$

the angle of approach of waves to the surf zone:

$$\tan \varphi = \frac{V_{cx}}{V_c}. \quad (9)$$

In the case of a rounded river stretch, the angle of approach of ship waves is determined from the sine theorem: the sides of the triangle are proportional to the sine of opposite angles. In our case, the sides are the radius of curvature of the outer concave bank R_{out} and the radius of curvature of the trajectory of the vessel R_c (see Fig. 5):

$$\frac{R_{out}}{\sin(90 + 19^\circ 28')} = \frac{R_c}{\sin \theta}, \quad (10)$$

$$\text{Hence } \sin \theta = \frac{R_c}{R_{out}} \sin(90 + 19^\circ 28') = 0,94 \frac{R_c}{R_{out}}.$$

Fig. 5. Calculation of the angle of approach of ship's waves to a rounded bank

According to the Fig. 5 it can be seen that the outer bank is subject to the influence of ship's waves practically in any case, while to the inner bank — frontally, but with a delay having lost some of the energy on the way.

The system of equations (5)–(10) fully describes the calculation of the angle of approach of ship waves to the bank, which depends on the slope of the bottom in the surf zone, the width of the river, the speed of

the river and the speed of the vessel. As the X-component approaches the bank, the velocity of the diagonal wave decreases along with the surface flow with an unchanged Y-component, which changes the approach angle of the wave. On wide rivers, this angle is less than on narrow ones. This parameter is important for calculating the dynamics of the coastal equilibrium profile.

Thus, the system of equations (1)–(10) is obtained for calculating the rate of erosion of the banks due to flow and wave motion created by the vessels at the turn of the river bed, namely:

1. The amount of eroded material is found from the formula (1).
2. The flow rates distribution at the entrance to the curvature is expressed by the formula (3).
3. The speed scale on the caving line when approaching ship waves at an angle φ is determined from (2).
4. From the range of permissible values for (5) the time of the beginning of the ship waves impact on the bank is determined.
5. The coordinate of the beginning of the collapse of waves approaching the bank — (7), substituting it in (6), we find the flow rate of the main flow at a given

point, hence from (8) we find the X-component of a suitable ship's wave and from (9) — the angle of the approach of waves in the case a straight line.

In the case of a rounded channel, the approach angle of the ship's waves is determined from (10).

CONCLUSIONS

1. The erosion of the banks in the cryolithozone is due to the movement of the actual flow and flows created by the vessels.
2. A system of equations is obtained for calculating the speed of erosion of concave banks and erosion of the alluvium plus the opposite and convex.
3. Ship's waves affect the outer bank in almost any case of passing the vessel, while the waves on the inner bank are frontal, but with a delay losing some of the energy on the way.
4. In combination with the previously obtained equations of erosion of frozen banks, a model is suggested that combines the effect of the flow on rounded banks, including during thawing of the rock, as well as under the influence of ship waves, depending on the parameters of the vessel's movement.

REFERENCES

1. Rozovskiy I.L. *Dvizhenie vody na povorote otkrytogo rusla* [The movement of water at the turn of the open channel]. Kiev, AN USSR, 1957. 188 p. (In Russian)
2. Debol'skiy V.K., Maslikova O.Ya., Ionov D.N., Gritsuk I.I., Dzhumagulova N.T. Laboratornoe issledovanie vliyaniya potoka na protaivanie podvodnogo sklona i tempy beregovoy erozii v usloviyakh kriolitozony [Laboratory study influence of flow on thawing of underwater slopes and the pace coastal erosion of rivers, occurring in the permafrost zone]. *Vestnik RUDN. Ser.: Inzhenernye issledovaniya* [RUDN Journal of Engineering researches]. 2017, vol. 18, no. 2, pp. 182–191. DOI: 10.22363/2312-8143-2017-18-2-182-191. (In Russian)
3. Pethiyagoda R. Mathematical and computational analysis of Kelvin ship wave patterns. Submitted in fulfilment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy. *Queensland University of Technology*, 2016. 52 p. URL: https://eprints.qut.edu.au/101167/1/Ravindra_Pethiyagoda_Thesis.pdf.
4. Pethiyagoda R., McCue S.W., Moroney T.J. Spectrograms of ship wakes: identifying linear and non-linear wave signals. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017, vol. 811, issue 1, pp. 189–209.
5. Gomit G., Chatellier L., Callaud D., David L., Frchou D., Boucheron R. et al. Large scale free surface measurement for the analysis of ship waves in a towing tank. *Experiments in Fluids*. 2015, vol. 56, issue. 10, pp. 1–13. DOI: 10.1007/s00348-015-2054-z.
6. Abdeljalil Benmansour, Benameur Hamoudi and Lahouari Adjlout. Effect of ship bow overhang on water shipping for ship advancing in regular head waves. *Journal of Marine Science and Application*. 2016, vol. 15, issue 1, pp. 33–40. DOI: 10.1007/s11804-016-1345-y.
7. Pethiyagoda R., Moroney T.J., MacFarlane G.J., Binns J.R., McCue S.W. Time-frequency analysis of ship wave patterns in shallow water: modelling and experiments. *Ocean Engineering*. 2017, vol. 158, pp. 123–131. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.108.
8. Hariharan G., Sathiyaseelan D. Efficient spectral methods for a class of unsteady-state free-surface ship models using wavelets. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 2017, vol. 68, issue 2, pp. 1–15. DOI: 10.1007/s00033-017-0777-9.
9. Wu H., He J., Zhu Y., Noblesse F. The Kelvin-Havelock-Peters farfield approximation to ship waves. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2018, vol. 70, pp. 93–101. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2018.03.004.
10. He J., Zhang C., Zhu Y., Zou L., Li W., Noblesse F. Interference effects on the Kelvin wake of a catamaran represented via a hull-surface distribution of sources. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2016, vol. 56, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2015.10.009.
11. Zhang C., He J., Zhu Y., Yang C.-J., Li W., Zhu Y. et al. Interference effects on the Kelvin wake of

a monohull ship represented via a continuous distribution of sources. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2015, vol. 51, pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.euro-mechflu.2014.12.006.

12. Ma C., Zhu Y., Wu H., He J., Zhang C., Li W. et al. Wavelengths of the highest waves created by fast monohull ships or catamarans. *Ocean Engineering*. 2016, vol. 113, pp. 208–214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.042.

13. Zhu Y., Ma C., Wu H., He J., Zhang C., Li W. et al. Farfield waves created by a catamaran in shallow water. *European Journal of Mechanics — B/Fluids*. 2016, vol. 59, pp. 197–204. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2016.06.003.

14. Li Y., Ellingsen S.Å. Ship waves on uniform shear current at finite depth: wave resistance and critical velocity. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016, vol. 791, pp. 539–567. DOI: 10.1017/jfm.2016.20.

15. Ellingsen S.Å. Ship waves in the presence of uniform vorticity. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014, vol. 742. DOI: 10.1017/jfm.2014.28.

16. Arzhannikov A.V., Kotelnikov I.A. Excitation of ship waves by a submerged object: New solution to the classical problem. *Physical Review E*. 2016, vol. 94, issue 2. DOI: 10.1103/physreve.94.023103.

17. Yu Z., Amdahl J. A review of structural responses and design of offshore tubular structures subjected to ship impacts. *Ocean Engineering*. 2018, vol. 154, pp. 177–203. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.02.009.

18. Chen X., Zhu R., Zhao J., Zhou W., Fan J. Study on weakly nonlinear motions of ship advancing

in waves and influences of steady ship wave. *Ocean Engineering*. 2018, vol. 150, pp. 243–257. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.053.

19. Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. *Teoreticheskaya gidromekhanika. Chast' I* [Theoretical hydromechanics. Part 1]. 6th ed., rev. and ad. Moscow, Fizmatlit publ., 1963. 583 p. (In Russian)

20. Kasana R.D., Podymov I.S., Pehowa N.V. ed. *Dinamicheskie protsessy beregovoy zony morya* [Dynamic processes of the coastal zone of the sea]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2003. 320 p. (In Russian)

21. Leont'ev I.O. *Dinamika priboynoy zony* [Surf-zone dynamics]. Moscow, AN SSSR, In-t okeanologii im. P.P. Shirshova Publ., 1989. 184 p. (In Russian)

22. Longuet-Higgins M.S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 2. *Journal of Geophysical Research*. 1970, vol. 75, issue 33, pp. 6790–6801. DOI: 10.1029/jc075i033p06790.

23. Gritsuk I.I., Debol'skaya E.I., Debol'skiy V.K., Maslikova O.Ya., Ponomarev N.K. Vliyanie osadkov v vide dozhdya na deformatsii beregovogo sklona rusel rek v usloviyakh mnogoletnemerzlykh porod [Influence of rainfall precipitation on the deformation of the river bank channels in permafrost]. *Led i sneg* [Ice and Snow]. 2012, vol. 52, no. 3, pp. 73–78. DOI: 10.15356/2076-6734-2012-3-73-78. (In Russian)

24. Debol'skiy V.K., Zaydler R., Massel' S. et al. *Dinamika ruslovykh potokov i litodinamika pribrezhnoy zony morya* [Dynamics of channel flows and lithodynamic coastal zone]. Moscow, Nauka Publ. 302 p. (In Russian)

Received June 25, 2018.

Adopted in final form on July 30, 2018.

Approved for publication on August 29, 2018.

ABOUT THE AUTHOR: **Oksana Ya. Maslikova** — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, **Institute of Water Problems Russian Academy of Sciences (IWP RAS)**, 3 Gubkina st., Moscow, 119333, Russian Federation, oksana68@mail.ru.