

grafiya /; Federanoe gos. Unitarnoe predpriyatie "Kaspijskij nauch.-issled. in-t rybnogo khoz-va" (FGUP "KaspNIRKH"). – Astrakhan: FGUP "KaspNIRKH", 2014 g, S. 56-99.

7. **Chugunov N.L.** Biologiya molodi promyslovykh ryb Volgo-Kaspijskogo rajona. /LGr. Astrakhanskoy nauchnoj Rybokhozyajstvennoj Stantsii. T. VI, vyp. 4, 1928, 282 s.

8. **Koblitskaya A.F.** Izuchenie neresta presnovodnykh ryb. – M.: Pishchevaya promyshlennost. 1966. – 109 s.

9. **Alekhina R.P., Kurapov A.A., Finaeva V.G.** Rezhim vesennikh popuskov i ego vliyanie na rannij ontogenez poluprokhodnykh ryb Volgo-Kaspijskogo rajona // 4-ya Vsesoyuz. konf. Po rannemu ontogenezu ryb. Tez. dokl. – Murmansk, 1988. – S. 16-18.

10. **Koblitskaya A.F.** Vliyanie dlitel'nogo zaregulirovaniya stoka reki i kolebanij urovnya Kaspijskogo morya na estestvennoe razmnozhenie promyslovykh ryb v ustjevoj oblasti Volgi // Ekologiya molodi i problem

vosproizvodstva kaspijskikh ryb: sb. nauch. Trudov FGUP «KaspNIRKH». M.: VNIRO, 2001. S. 126-138.

The material was received at the editorial office
04.06.2018 g.

Information about the authors

Zhezmer Valentin Borisovich, candidate of agricultural sciences, the leading researcher, head of the department of safety of hydraulic structures of irrigation and drainage complex (FGBNU «VNIIGiM named after A.N. Kostyakov»). Tel / Fax: +7(499)1532133, e-mail: v1532133@yandex.ru

Buber Alexander Leonidovich, Leading Researcher, Head of the Department of Melioration and Water Management Complex (FGBNU VNIIGIM named after A.N. Kostyakov), 127550, Moscow, ul. Bolshaya Akademicheskaya, 44, building. 2; tel.: +7(499)1531678; e-mail: buber49@yandex.ru, buber@vniigim.ru

УДК 502/504:532.592.7

DOI 10.26897/1997-6011/2018-5-30-35

О.Я. МАСЛИКОВА, В.К. ДЕБОЛЬСКИЙ

Институт водных проблем РАН, г. Москва, Российская Федерация

ВОЗДЕЙСТВИЕ СУДОВЫХ ВОЛН НА ДИНАМИКУ БЕРЕГОВОГО СКЛОНА

Воздействие судовых волн на берег, сложенный рыхлыми песчаными отложениями, обуславливает деформации подводного склона. Перенос размываемого грунта волновым потоком в продольном и поперечном направлениях приводит к значительным изменениям морфологических характеристик русла и, в результате, к уменьшению глубин на судовом ходу. С другой стороны, для полноценного проектирования берегозащитных работ требуется знание поведения береговой линии в естественных условиях, установление взаимосвязи между волнами, подходящими к берегу и характеристиками произведенного профиля берега. Предлагается аналитический метод расчета, позволяющий оценить ряд характеристик, достаточно полно отражающий условия динамики прибрежной зоны: параметры поля высот волн, средний волновой уровень, скорость вдольбереговых течений, продольные расходы песчаных наносов с целью выявления оптимальных параметров судового движения. Рассматривается возникновение волн под действием движущихся судов, рассчитывается амплитуда и угол подхода волн к берегу. В результате, зная состав пород, слагающих берег, можно предложить максимальные скорости движения судов как по течению, так и против течения, при которых профиль равновесия берегового склона останется ненарушенным. Можно решать и обратную задачу: зная необходимые скорости движения водного транспорта, создавать искусственные вдольбереговые насыпи, наименее чувствительные к данным воздействиям.

Геофизика, прибрежная зона, русловые процессы, физические процессы, деформации профиля дна.

Введение. При проектировании строящихся гидротехнических объектов, а также

при реконструкции существующих в числе прочего следует учитывать влияние судовых

волн, которые, подходя к берегам, разрушают их. 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. Характеристики этого воздействия, такие как: направления распространения, высоты и периоды волн определяются характеристиками судна (разные типы, тяга, скорость) и направлением их движения. Разрушительная сила судовых волн наиболее полно проявляется на берегах, сложенных рыхлыми песчаными отложениями. При приближении судна, идущего полным ходом, уровень воды возле берега заметно повышается. Как только судно поравняется с берегом, начинаются 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. В настоящей работе 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 их обсуждение. Параметры судовых волн. Так как судовые волны приблизительно можно считать плоскими, то высота волны, исходящей от судна в момент возникновения, равна высоте волны, подходящей к прибрежной зоне. Можно рассчитать все параметры рассматриваемых волн, используя заданные параметры судна. Значения высоты h_{sh} , м, и длины λ_{sh} , м, волн, возникающих при движении водоизмещающих судов, следует определять по формулам [1]:

$$h_{sh} = \frac{2V^2}{g} \sqrt{\frac{\delta d_s}{l_u}}; \quad \lambda_{sh} = 5,65 \frac{V^2}{g} \quad (1)$$

где d_s и l_u – осадка и длина судна, м; V – скорость судна, м/с; δ – коэффициент полноты водоизмещения судна. При определении параметров волны, возникающей при движении водоизмещающих судов в водотоках (реках, каналах), следует

учитывать, что скорость судна не должна превышать допустимое значение V_{adm} , определенное нормативными актами для рассматриваемого водного пути. При отсутствии нормативных данных V_{adm} обычно считают по формуле:

$$V_{adm} = 0,9 \sqrt{\left[6 \cos \frac{\pi + \arccos(1 - k_a)}{3} - 2(1 - k_a) \right] g \frac{A}{b}} \quad (2)$$

где k_a – отношение подводной площади поперечного сечения судна к площади живого сечения канала A , м; b – ширина канала, м, по урезу воды. При двухстороннем движении однотипных судов численное значение k_a в формуле (2) следует принимать увеличенным вдвое.

Высоту наката h_{rsh} , м, судовой волны на откос (рисунок 1) следует определять по формуле

$$\text{(при } V \leq V_{adm}\text{): } = \beta_{sl} \frac{0,5h_{sh} + 0,05 \cot \varphi \frac{V^2}{g}}{1 - 0,05 \cot \varphi} \quad (3)$$

где β_{sl} – коэффициент (для откосов, облицованных сплошными плитами, равным 1,4, каменным мощением – 1,0 и каменной наброской – 0,8).

При отсутствии облицовки волну наката можно считать [2]

$$L = \frac{g \tan i T^2}{2\pi} \quad (4)$$

T – период волн, i – угол заложения откоса.

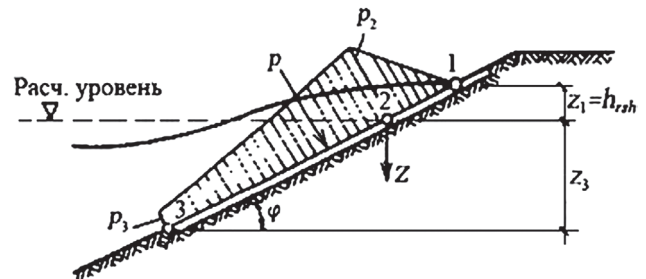


Рис. 1. Эпюра давления судовых волн на крепления берегов каналов при накате волны на откос

Транспорт наносов. Количество материала, которое будет эродировано, или транспортирующая способность потока, зависит от средней по глубине скорости течения воды, глубины потока и гидравлической крупности частиц [2]:

$$S_{tp} = 2,4 \cdot 10^{-3} \frac{U^3}{ghw}, \quad (5)$$

где S – транспортирующая способность потока; U – средняя скорость потока; h – глубина потока; w – гидравлическая крупность материала, слагающего берег.

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

$$U = \frac{5\pi^2 H^2}{4TLsh^2 kh} \quad (6)$$

H – высота волн, L – длина наката волны

Умножая выражение (5) на время прохождения судна, которое равно отношению длины судна к его скорости, получаем объем размыва от воздействия одного судна.

Угол распространения волн за судном. От носа и кормы образуются самостоятельные волновые системы, которые интерферируют друг с другом. По [3]:

$$r = \frac{1}{2} V_c t \cos \theta \quad (7)$$

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:

$$\theta = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{4y}{ct} \right) \quad (8)$$

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.

В [3] 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. 2 показано, что через любую точку внутри этого раствора проходит два вида кривых одинаковой фазы.

Влияние течения реки на распространение судовых волн. В [3] было доказано, что скорость распространения образующихся при движении корабля поперечных волн равна скорости самого корабля. Посчитаем скорость распространения V диагональных (расходящихся) волн (рис. 3). 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.

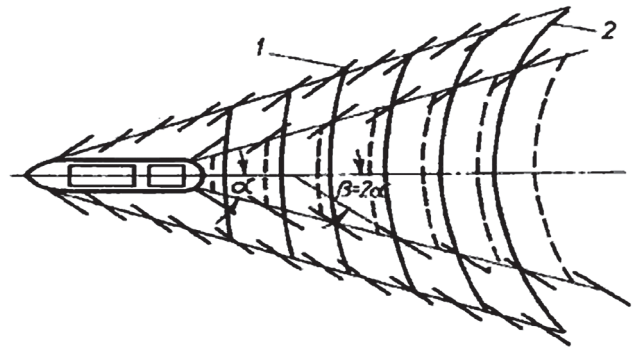


Рис. 2. Волны судовые:
1 – расходящиеся; 2 – поперечные
Фото с сайта <http://udivitelno.com/mesta/item/396-gejranger-ford-norvegija-foto>

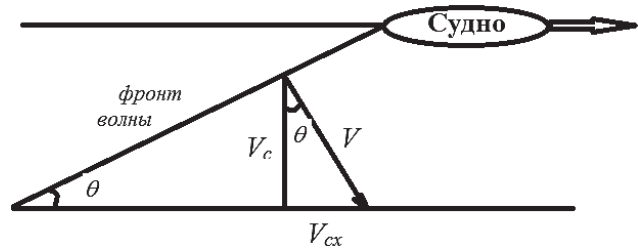


Рис. 3. Распространение диагональных волн

Определим поверхностную скорость течения реки в виде:

$$U_y = U_R \sqrt[3]{1 - \left(\frac{y}{y_{max}} \right)^3} \quad (9)$$

Здесь U_R – 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 [Лонге-Хиггинс] $\gamma_B = \frac{H_{sh}}{h} = 0,8$.

$$y' = \frac{H_{sh}}{0,8 \tan i} \quad (10)$$

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:

$$V_{cx} = 0,35V_c \pm U(y'), \quad (11)$$

Угол подхода волн к прибойной зоне:

$$\tan \varphi = \frac{V_{cx}}{V_c} \quad (12)$$

Таким образом, система уравнений (9-12) 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.

Вдольбереговые течения. В динамике береговой (или прибрежной) зоны, определяемой как зона взаимодействия волн с дном, главную роль играют волновые течения. Они возникают отчасти благодаря стоковому переносу масс, но главным образом как результат процессов диссипации энергии и потери импульса в волнах, распространяющихся к берегу, и образуют в совокупности систему прибрежных течений (nearshorecurrentsystem- в англоязычной литературе).

Ее элементами являются как поперечные по отношению к изобатам, так и продольные (вдольбереговые) течения. К поперечным могут быть причислены потоки, связанные со стоковым переносом и направленные к берегу, а также компенсационное противотечение (undertow), действующее в противоположном направлении. Сюда же относятся и разрывные течения (ripcurrents) в виде узких струй, отходящих от берега. Вдольбереговые течения условно подразделяются на энергетические, генерируемые при косом подходе волн, и градиентные, обусловленные изменениями среднего уровня [4]. При наблюдениях в природных условиях бывает довольно трудно идентифицировать тот или иной вид течений, поскольку все они, как правило, действуют одновременно [5]. На участках, где направления энергетического и градиентного течений со-

впадают, 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 [6], 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. Лонге-Хиггинс [7] 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 [5]:

$$V_0 = \frac{5\pi}{16} \gamma_B \frac{\beta}{C_f} \sqrt{gh} \sin \varphi \quad (13)$$

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.

На рисунке показан поперечный профиль вдольберегового течения над плоским наклонным дном по Лонге-Хиггинсу [7]. Параметр P характеризует отношение вкладов бокового перемешивания и донного трения. При максимальной относительной высоте разрушающихся волн $\gamma = 0.8$ (критерий разрушения одиночных волн) имеем приблизи-

тельно $P = 4\beta$, y – расстояние от берега, y_B – ширина прибойной зоны, V – переносная скорость.

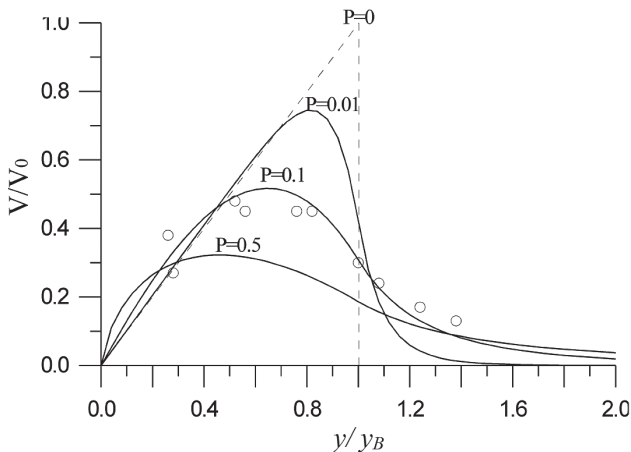


Рис. 4. Поперечный профиль вдольберегового течения над плоским наклонным дном по Лонге-Хиггинсу при различных значениях параметра перемешивания P . Точки относятся к значениям $P = 0.14-0.16$

Профиль динамического равновесия. Уравнение профиля динамического равновесия при нормальном подходе волн к берегу [6]:

$$\frac{dh}{dx} + \frac{8}{\gamma^2} \frac{W}{C_0} \left(\frac{h_0}{h} \right)^{\frac{1}{2}} - A = 0, \quad (14)$$

где h – локальная глубина, h_0 – глубина начала разрушения волн, $C_0 = \sqrt{gh_0}$ – фазовая скорость на глубокой воде, близкая к фазовой скорости в мелководной прибрежной зоне, $\gamma = H/h$ – отношение высоты волн к глубине в данной точке, $\frac{dh}{dx} = \tan i$ – средний уклон, W – гидравлическая крупность твердых частиц, слагающих дно, $\frac{C_0}{W}$ – характеристика подвижности наносов, поскольку возможности перемещения твердых частиц увеличиваются как с ростом силы волнения (с ростом h_0), так и с уменьшением их крупности.

Величина A включает в себя ряд констант и имеет смысл осредненной по профилю характеристики асимметрии волновых скоростей. Анализ данных [8] показал четкую линейную зависимость, определяемую уравнением:

$$A = 22,8 \frac{W}{C_0}$$

Подставляя в выражение (14) масштаб скорости на линии обрушения (13) и интегрируя по времени прохождения судна, ко-

торое равно отношению длины судна к его скорости, можно получить объем размыва от воздействия одного судна.

Выводы

Исходя из теории волнообразования под воздействием движущихся судов, рассчитывается амплитуда и угол подхода волн к берегу. На основе модели деформации профиля дна в прибрежной зоне, предложенной И.О. Леонтьевым, была выведена зависимость размыва берегового склона от судового волнения. Зная состав пород, слагающих берег, можно предложить максимальные скорости движения судов как по течению, так и против течения, при которых профиль равновесия берегового склона останется ненарушенным. Можно решать и обратную задачу – зная необходимые скорости движения водного транспорта создавать искусственные вдольбереговые насыпи, наименее чувствительные к данным воздействиям.

Интегрирование воздействий этих скоростей во времени позволит определить интенсивность переформирования берегов водных объектов и разработать мероприятия по их укреплению.

Таким образом, предложена теория воздействия судовых волн на береговые насыпи и сооружения, объединяющая описание возникновения и распространения судовых волн, исследования существования и сохранения профиля динамического равновесия берега, а также теорию транспорта наносов в потоке.

Библиографический список

1. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) СНИП строительные нормы и правила. <https://docplan.ru/Data2/1/4293793/4293793649.htm>
2. Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. / под ред. Дебольского В.К. – М.: Наука, 1994. – 303 с.
3. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. I. Под ред. И.А. Кибеля., 6-е изд., испр. и доп. – М.: Физматлит, 1963. – 583 с.
4. Шадрин И.Ф. Течения береговой зоны бесприливного моря. – М.: Наука. 1972. – 128 с.
5. Динамические процессы береговой зоны моря. / Под ред. Р.Д. Косьяна, И.С. Подымова, Н.В. Пыхова). – М.: Научный мир, 2003. – 320 с.

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

7. Longuet-Higgins M.S. Longshore currents generated by obliquely incident waves. Parts 1 and 2. J. of Geophys. Res. 1970. V. 75. № 33. P. 6778-6801.

8. Леонтьев И.О. Профиль динамического равновесия: проверка теории. // Океанология. – 1992. – т. 32, вып. 2. – С. 355-361.

Материал поступил в редакцию 24.06.2018 г.

O.YA. MASLIKOVA, V.K. DEBOLJSKY

Ras institute of water problems, Moscow, Russian Federation

IMPACT OF SHIP WAVES ON THE DYNAMICS OF COASTAL SLOPE

The impact of ship waves on folded by loose or sand deposits shore, causes deformations of the underwater slope. The transfer of the eroded soil by the wave flow in the longitudinal and transverse direction leads to a significant change in the morphological characteristics of the channel and, as a result, to a decrease in depth on the ship's run. On the other hand, for the rational design of bank protection works, knowledge of the behavior of the shoreline in natural conditions is required, establishing the relationship between the waves approaching the shore and the characteristics of the produced shore profile. The analytical method of calculation is proposed, which makes it possible to evaluate a number of characteristics, parameters of wave completeness, average wave level, speed of alongshore currents, longitudinal expense of sand with tasks of optimal parameters of ship velocities. The appearance of waves under the action of moving vessels is considered, the amplitude and angle of approach of the waves to the shore are calculated. As a result, knowing the composite soil of the shore, it is possible to offer the maximum speed of the vessels' movement along the flow and against the flow, at which the equilibrium profile of the coastal slope will remain permanent. It is also possible to solve the inverse problem – knowing the necessary speed of water transport, create artificial coastal embankments, the least sensitive to these impacts.

Geophysics, coastal zone, channel processes, physical processes, deformation of the bottom profile.

References

1. SP 38.13330.2012. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotehnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov) SNIP stroitelnye normy i pravila. <https://docplan.ru/Data2/1/4293793/4293793649.htm>

2. Dinamika ruslovyh potokov i litodinamika pribrezhnoj zony morya. / pod red. Debolskogo V.K. – М.: Nauka, 1994. – 303 s.

3. Kochin N.E., Kibel I.A., Roze N.V. Teoreticheskaya gidromekhanika. Ch. I. Pod red. I.A. Kibelya, 6-e izd., ispr. i dop. – М.: Fizmatlit, 1963. – 583 s.

4. Shadrin I.F. Teheniya beregovoj zony cheniya besprilivnogo morya. – М.: Nauka. 1972. – 128 s.

5. Dinamicheskie protsessy beregovoj zony morya. / Pod red. R.D. Kosjana, I.S. Podymova, N.V. Pyhova). – М.: Nauchny mir, 2003. – 320 s.

6. Leontjev I.O. Dinamika pribojnoj zony. – М.: in-t okeanologii im. P.P. Shirshova AN SSSR, 1989. – 184 s.

Сведения об авторах

Масликова Оксана Яковлевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИВП РАН; 119333, г. Москва, ул. Губкина, д.3; тел.: +7(499)1357201, e-mail: oksana68@mail.ru

Дебольский Владимир Кириллович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией ИВП РАН; 119333, г. Москва, ул. Губкина, д.3; тел.: +7(499)1357201, e-mail: vdebolsky@mail.ru

7. Longuet-Higgins M.S. Longshore currents generated by obliquely incident waves. Parts 1 and 2. J. of Geophys. Res. 1970. V. 75. № 33. P. 6778-6801.

8. Leontjev I.O. Profil dinamicheskogo ravnovesiya: proverka teorii. // Okeanologiya. – 1992. – т. 32, вып. 2. – С. 355-361.

The material was received at the editorial office
24.06.2018 g.

Information about the authors

Maslikova Oksana Yakovlevna, candidate of technical sciences, senior researcher IVP RAN; 119333, Moscow, ul. Gubkina, d. 3; tel.: +7(499)1357201, e-mail: oksana68@mail.ru

Debolsky Vladimir Kirillovich, doctor of technical sciences, professor, head of the chair IVP RAN; 119333, Moscow, ul. Gubkina, d. 3; tel.: +7(499)1357201, e-mail: vdebolsky@mail.ru