

ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 556.468:504.06

О НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА, ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ В СУДОХОДНОМ КАНАЛЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДВИЖУЩИХСЯ СУДОВ¹

© 2011 г. В. А. Чечко, Б. В. Чубаренко, В. Ю. Курченко

Атлантическое отделение Института океанологии

Российской академии наук

236000 Калининград, просп. Мира, 1

Поступила в редакцию 11.05.2010 г.

Приведены результаты исследований взвешенного вещества в судоходном канале. Впервые получены натурные данные по концентрации взвеси непосредственно после прохождения судов, имеющих различную осадку. Показано, что величина концентрации взвеси зависит от осадки проходящего судна и типа грунтов, подстилающих дно канала. Приведены данные о фактических скоростях осаждения взвеси непосредственно после прохождения судов, которые наряду с описанными методическими приемами прямых расчетов можно использовать для оценки антропогенного воздействия на состояние окружающей среды в судоходных каналах, реках, водохранилищах.

Ключевые слова: донные осадки, взмучивание, водная взвесь, судоходный канал.

Эксплуатация судоходных каналов сопряжена с многофакторным антропогенным воздействием на их берега, ложе и водную среду. Характерное следствие такого воздействия – образование аномально высоких содержаний частиц донного грунта в водах канала, поднятых со дна свободной затопленной струей воды, вбрасываемой винтом движущегося судна [11]. Показано [14, 20], что концентрация взвешенного вещества в канале при движении судов может в несколько раз превышать таковую в сопредельном водоеме.

Взвешенные частицы, особенно их мелкодисперсные фракции, легко переносятся и отлагаются на расстоянии 10–15 км от места образования [18]. При открытых каналах определенная доля частиц грунта, поднятых со дна проходящими судами, будет переноситься течениями в прилегающую акваторию. Учитывая, что трассы каналов нередко покрыты загрязненным слоем осадков, а основной перенос загрязняющих веществ (тяжелых металлов, например, до 80%) связан именно с динамикой взвеси [1], можно предположить, что поднятые со дна канала частицы грунта могут стать источником вторичного загрязнения водных бассейнов, по которым проходят трассы открытых подходов каналов.

Для оценки величин размыва поверхностного слоя донных осадков (ДО) гребными винтами судов и образованной при этом взвеси используют вычислительные методы [11, 15], но они основаны на

предположении об однородности ДО и других допущениях. В то же время, в естественных условиях характер образующейся взвеси будет зависеть от многих факторов – подстилающих дно канала грунтов, представляющих собой смесь частиц разной крупности, скорости и осадки проходящих судов, геометрии ложа канала, скорости и направления течений и так далее. Работ, посвященных влиянию каналов на экосистему сопредельной акватории [8] или натурным исследованиям взмучивания ДО [19], в отечественной научной литературе немного, очевиден недостаток фактических данных, необходимых для разработки методик оценки количества осадочного материала, переходящего из ДО во взвешенное состояние при движении судов.

В данной работе представлены результаты натурных экспериментов, поставленных с целью изучения водной взвеси, образующейся в судоходном канале при движении судов с различной осадкой. Все работы выполнялись в Калининградском морском канале (КМК), проходящем вдоль северного побережья Калининградского зал., расположенного в юго-восточной Балтике (рис. 1). Канал имеет длину 43 км, ширину фарватера 50–80 м и глубину 9–11 м в зависимости от участка и соединяет порты Калининграда, находящиеся в устьевой зоне р. Преголи, с Балтийским морем [6]. КМК (построен в 1901 г.) по сути своего предназначения и использования – промышленно-транспортная зона с интенсивным круглогодичным судоходством, хотя формально он отнесен к классу водоемов рыбохозяйственной категории. Его пропускная способ-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 08-05-01023 и 08-05-92421).

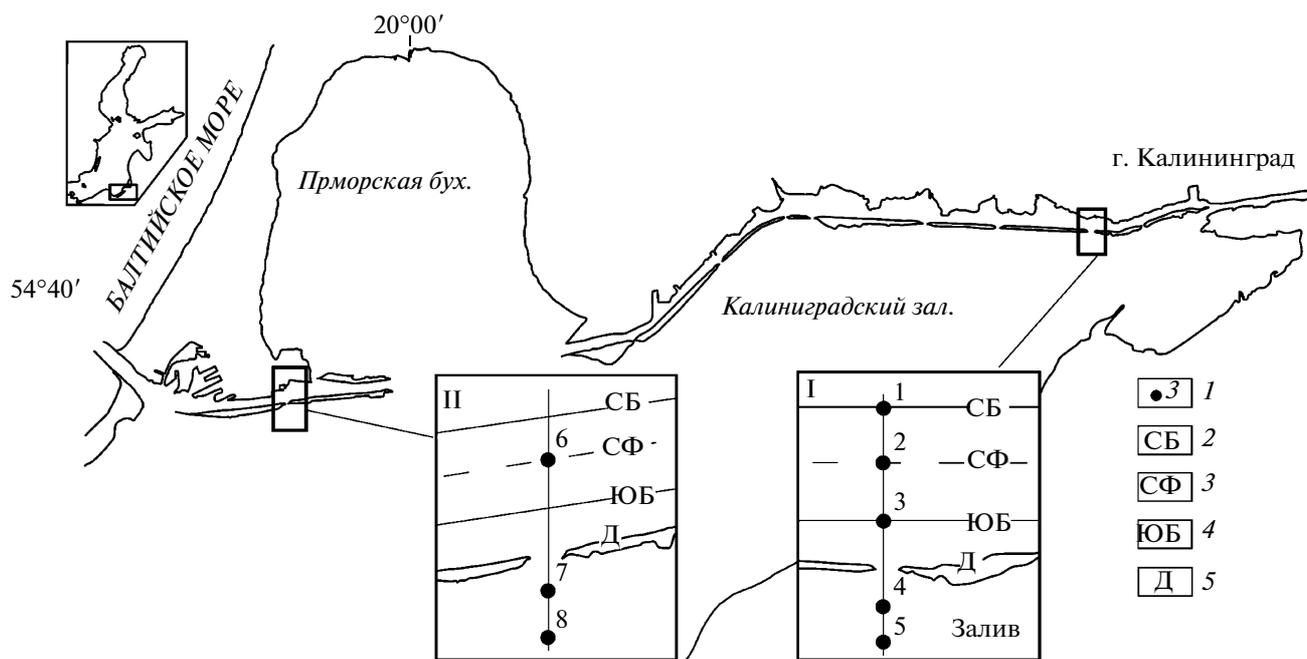


Рис. 1. Карта-схема расположения створов I и II на акватории КМК и станций отбора проб воды для определения концентрации взвешенного вещества. 1 – станция и ее номер, 2 – северная бровка фарватера канала, 3 – середина фарватера канала, 4 – южная бровка фарватера канала, 5 – оградительные дамбы канала.

ность составляет 4000–6000 судов различного тоннажа в год, из которых 35% имеют осадку >7 м. С южной стороны канал отделен от залива цепочкой островов-дамб с десятью протоками между ними (шириной до 30 м), через которые осуществляется ограниченный водообмен с заливом, но волнение с акватории залива практически не проникает. В районе Приморской бухты цепь дамб разрывается, и на протяжении почти 4 км фарватер канала проходит по открытой части залива.

Устойчивые течения, вызванные стоком р. Преголи и способные создавать специфические стационарные русловые условия взвешивания и осаждения наносов [22], в канале отсутствуют. Канал, будучи сопряженным с заливом и достаточно экранированным залесенными островами дамбы от прямого воздействия ветра, – место возникновения компенсационных потоков при ветровом воздействии на зеркало залива, что обеспечивает в нем разнонаправленный режим течений в зависимости от воздействия ветра [21].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу настоящего исследования положены результаты натурных экспериментов в летний сезон 2005 г. Экспедиционная часть исследований по оценке фоновых содержаний взвеси и ее изменений, обусловленных движением судов, заключалась в отборе проб воды на постоянных створах до и после пересечения их линии судами с различной осад-

кой. Рабочая гипотеза состояла в том, что количество переходящего в водную толщу взмученного ДО будет зависеть, в первую очередь, от физико-механического состава ДО, осадки и скорости проходящих судов. В связи с этим на подготовительном этапе была проведена детальная грунтовая съемка канала с выполнением гранулометрического анализа полученных проб согласно [10]. Фракции выделялись по десятичной системе (>1.0, 1.0–0.5, 0.5–0.25, 0.25–0.1, 0.1–0.05, 0.05–0.01, 0.01–0.005, <0.005 мм), типы осадков определялись по классификации П.Л. Безрукова и А.П. Лисицына [2].

На основе результатов грунтовой съемки были выделены два участка с характерными для канала типами ДО, на которых были определены места расположения створов для отбора проб воды во время прохождения судов. Отбор проб только на поперечном створе, без учета сноса взмученного материала течением, обусловлен тем, что судно при движении производит взмучивание на всем протяжении канала и, следовательно, процесс инвариантен по отношению к горизонтальной (вдоль канала) координате. Для сравнения данных, полученных в канале, с таковыми в заливе проводился параллельный отбор проб воды на станциях в прилегающей части залива. Створ I располагался на участке от порта Калининград до Приморской бух., где доминируют обводненные илистые отложения ($M_D = 0.034$ мм), а створ II – на участке канала от Приморской бух. до входных молов в Балтийске, на котором преобладают крупные алевриты с мелкозернистым песками

(MD = 0.096 мм). На створе I станции располагались на середине фарватера, на его южной и северной бровке и в прилегающей части залива, а на створе II — только на середине фарватера и в прилегающей части залива (рис. 1). На середине фарватера (глубина 9.1–9.3 м) пробы воды отбирались из поверхностного, промежуточного (4.0 м от поверхности воды) и придонного (8.5 м) горизонтов, на бровках — из поверхностного и придонного (3.5 м) (рис. 2). На станциях, расположенных в заливе, из-за небольших глубин отбор проб проводился только с промежуточного горизонта (0.5 м от поверхности).

Поскольку проход судов по каналу осуществляется группами поочередно на вход и на выход, то последовательность проведения полевых работ была следующей. На основе данных из диспетчерской службы КМК о времени движения судна с определенной осадкой и при условии, что это судно идет первым в караване, две научные группы на плавсредствах выходили к намеченным створам в опережающем режиме до подхода каравана (или одиночного судна). В невозмущенных условиях (спустя нескольких часов после прохода предыдущего каравана и до подхода нового) проводился отбор проб воды на станциях со всех горизонтов для определения фонового содержания взвеси. В данном случае под фоновым содержанием авторы подразумевают содержание взвешенного вещества в невозмущенной непосредственно проходящими судами водной толще. Тогда же с помощью поплавков нейтральной плавучести проводились измерения скорости течения в канале. Во всех экспериментах скорость на поверхности не превышала 9 см/с, а скорость на горизонте 5 м — 5 см/с. В целях обеспечения синхронного отбора проб по вертикали на каждой станции параллельно проводились работы по отбору поверхностной пробы (пластиковым ведром) и проб с разных горизонтов (винипластовыми 10-л батометрами системы Нискина). Вода из ведра и батометров переливалась в пластиковые бутылки, в которых она доставлялась в стационарную лабораторию.

Отбор проб на каждом из створов после прохода судна осуществлялся в 3–4 цикла: сразу после пересечения судном линии створа, через 20, 40 и 60 мин после пересечения. Отбор проб проводился по описанной выше методике строго на тех же станциях и горизонтах, что и при оценке фонового содержания взвеси. Эти циклы давали возможность получить данные, необходимые для оценки характерного времени уменьшения концентрации взвеси за счет осаждения частиц после прохода судна.

Полевые измерения на обоих створах были выполнены при прохождении следующих типов судов: буксира “Зюйд” (осадка 1.2 м), контейнеровоза “Coastal Sound” (5.0 м), пассажирского судна “Колумбия” (5.7 м), парома “Георг Отс” (5.7 м), танкера “Oderstern” (7.0 м) и танкера “Dicksi” (7.7 м). Скорость движения для всех судов принималась одина-

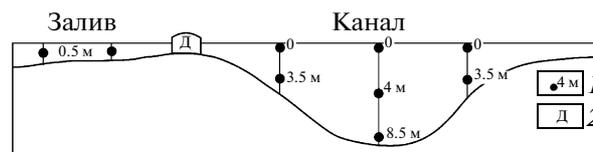


Рис. 2. Схема отбора проб для определения концентрации взвешенного вещества в толще воды. 1 — горизонт отбора проб (глубина от поверхности воды, м), 2 — оградительные дамбы канала.

ковой, так как скоростной режим судов в канале — регулируемый и ограничен шестью узлами.

В лабораторных условиях выделение взвеси проводилось методом мембранной ультрафильтрации с весовым определением количества взвеси и последующим ее микроскопическим исследованием [4, 9]. В связи с невозможностью получить объемы взвешенного материала, необходимые для выполнения водно-механического анализа, гранулометрический состав взвеси определялся микроскопическим методом с пересчетом количества частиц на вес по известной методике [3, 4]. При этом допускалось, что все частицы имеют шаровидную форму. При подсчете объемов частиц авторами принимались следующие удельные веса: органический детрит и железосодержащие частицы — 1.0 г/см³, кремнистые — 2.2, карбонатные и прочие терригенные частицы 2.6, рудные (черные и бурые) — 4 г/см³.

Осаждение частиц взвеси происходит со скоростями, зависящими не только от размера частиц, но и от интенсивности турбулентности в водной среде, которая в свою очередь зависит от ее стратификации. Поскольку условия в водной среде меняются с течением времени после прохода судна, а на каждом горизонте скорость изменения концентрации взвеси зависит от скоростей осаждения частиц с этого горизонта вниз и от их поступления в этот горизонт из вышележащих слоев, то для получения информации о скорости процесса осаждения проводились прямые натурные определения концентрации взвеси на трех горизонтах сразу и спустя некоторое время после прохождения судна. В предположении, что концентрация $C(t, z_0)$ на фиксированном горизонте z_0 экспоненциально спадает по времени (из-за интегрального самоочищения за счет осаждения взвеси разной крупности [17]), приближаясь к фоновому значению C_{bckgr} , можно описать ее значение в любой момент времени в виде зависимости

$$C(t, z_0) = C_{\text{bckgr}} + (C_{\text{max}} - C_{\text{bckgr}})e^{-\alpha t}, \quad (1)$$

где C_{max} , мг/л, — максимальное значение концентрации (в данном случае — сразу после прохождения судна), α (с⁻¹) — коэффициент, характеризующий скорость осаждения. При использовании измеренных значений концентрации в начальный момент —

Таблица 1. Фоновое (в невозмущенной проходящими судами воде) содержание взвеси, мг/л, на створах I, II и в прилегающих участках залива

Дата отбора проб, направление и скорость ветра, м/с	Створ I								Створ II					
	канал						залив		канал, середина фарватера (ст. 6)			залив		
	северная бровка (ст. 1)		середина фарватера (ст. 2)		южная бровка (ст. 3)		ст. 4	ст. 5				ст. 7	ст. 8	
	горизонт отбора проб – глубина от поверхности воды, м													
	0	3.5	0	4.0	8.5	0	3.5	0.5	0.5	0	4.0	8.5	0.5	0.5
13.05, СЗ, 3–5	33.2	37.3	28.8	23.8	36.8	30.4	34.6	26.9	22.3	24.4	25.9	37.9	20.9	18.4
31.05, СЗ, 4–5	24.7	34.4	23.0	20.0	34.4	29.5	36.8	19.5	16.9	20.4	22.8	33.4	17.5	14.8
17.06, З, 3–4	29.5	30.9	22.1	24.2	26.7	26.4	33.2	20.9	21.7	21.6	20.2	25.4	17.9	13.6
02.07, СЗ, 3–4	40.2	31.4	37.8	22.4	32.6	39.9	30.8	34.4	33.5	36.5	20.8	28.5	29.4	26.5
06.07, ЮЗ, 7–9	34.0	48.2	40.0	42.1	44.6	37.2	56.5	35.8	31.5	34.6	35.8	40.5	35.4	30.5
05.08, штиль	17.9	24.7	25.9	24.5	35.3	22.3	30.2	15.3	14.9	16.8	19.0	22.5	14.3	11.4

C_{\max} и в момент $t_1 - C_1$ (в данном случае через 20 или 40 мин) получается следующая зависимость для оценки характерного времени уменьшения концентрации взвешенных частиц на горизонте z_0

$$\tau_e = 1/\alpha = t_1 \ln \left(\frac{C_{\max} - C_{\text{bckgr}}}{C_1 - C_{\text{bckgr}}} \right). \quad (2)$$

Именно за это время превышение концентрации над фоном спадает в e раз, т.е. приблизительно в 2.7 раза. Более интересно с точки зрения практики – время, за которое превышение концентрации над фоном уменьшится до 10% своего первоначального значения, т.е. возмущение в поле концентрации теряет 90% своей величины. Это время можно назвать временем интегрального самоочищения, чтобы подчеркнуть интегральное падение концентрации взвеси вне зависимости от фракций

$$\tau_{90\%} = \tau_e \ln(10) = 2.3\tau_e. \quad (3)$$

Принятый в качестве первого приближения экспоненциальный закон падения концентрации со временем (1) соответствует гипотезе о пропорциональности скорости падения концентрации значению самой концентрации. Эта гипотеза косвенно включает в себя предположение об интегральном равновесии между поступлением и убылью частиц различной крупности в выделенном (на горизонте z_0) элементарном объеме воды за счет обмена частицами между соседними объемами воды и постепенном уменьшении концентрации частиц за счет осаждения и ослабления обмена частицами из-за диссипации турбулентности. Это предположение дает некоторую переоценку времени уменьшения концентрации взвешенных частиц на начальных этапах процесса и его недооценку – на заключительных этапах, когда осаждение одинаковых частиц на всех горизонтах происходит почти с одина-

ковой скоростью (вертикальные скорости движения воды и их флуктуации малы). Переоценка скоростей осаждения в начале процесса дает результат “в запас” [17], поскольку реальные скорости не могут быть выше тех, что получаются при оценке (2), полученной с помощью экспоненциальной зависимости (1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фоновое содержание водной взвеси

Анализ полученных результатов показал, что концентрация взвешенного вещества в невозмущенной проходящими судами водной толще меняется в довольно широком диапазоне – от 16.8 ÷ 40.2 мг/л в поверхностном слое до 22.5 ÷ 56.5 мг/л в придонном (табл. 1). При этом в придонном слое всегда отмечались более высокие (на 5 ÷ 63%) значения концентрации взвеси, чем на поверхности. Исключением были результаты измерений 2 июля, согласно которым концентрация взвеси на поверхности превышала таковую у дна. Наиболее вероятным объяснением такого распределения по вертикали можно считать увеличение доли органической компоненты во взвеси в поверхностном слое, так как именно на этот период приходится пик развития синезеленых водорослей в заливе [7], органические остатки которых фиксируются в полученных пробах данной съемки.

Обращает на себя внимание повышенная фоновая концентрация взвешенного вещества на створе I (за период наблюдений концентрация взвеси на нем составила в среднем для толщи воды 30.3 мг/л против 26.8 мг/л на створе II). Это обусловлено, прежде всего, литологическим составом ДЮ. В районе створа I распространены илестые отложения, тонкодисперсные частицы которых легко взмучи-

ваются под воздействием естественных и антропогенных факторов и удерживаются во взвешенном состоянии в толще воды после прекращения воздействия. Более грубые песчаные частицы, преобладающие в составе отложений на створе II, быстро оседают после взмучивания и, тем самым, не оказывают существенного влияния на повышение концентрации взвеси после прекращения гидродинамического воздействия на дно. Повышенные фоновые значения концентрации взвеси на створе I по сравнению со створом II объясняются также близостью створа I к устью р. Преголи, обеспечивающей поступление твердого стока, в то время как створ II находится в зоне нерегулярного, но довольно частого проникновения более прозрачных морских вод [16].

Следует отметить зависимость величины фоновой концентрации взвешенного вещества от гидрометеорологической обстановки, наблюдаемой в периоды отбора проб. Минимальные значения концентрации (16.8 ÷ 35.3 мг/л) зафиксированы в штилевых условиях, максимальные (34.0 ÷ 56.5 мг/л) — в период усиления ветровой активности.

На участках залива, прилегающих к каналу, фоновая концентрация взвешенного вещества в период исследований изменялась в пределах 11.4 ÷ 35.8 мг/л. В среднем по всем измеренным значениям концентрация взвеси в канале превышает таковую в заливе на 33%, а если брать во внимание только поверхностный горизонт, то на 22%. Причем, это соотношение выполняется для обоих створов. Более высокие значения фоновой концентрации взвеси в канале, чем на прилегающих участках залива, свидетельствуют о том, что ее формирование обусловлено не только естественными (речной сток, ветроволновое взмучивание ДО, продуцирование органического вещества), но и антропогенными факторами, важнейшее из которых — регулярное движение судов. В заливе количественный и вещественный состав взвеси определяется преимущественно естественными процессами [5, 12–14].

Содержание взвеси после прохождения судов

Согласно полученным данным, после прохождения по каналу судна с осадкой 1.2 м концентрация взвеси не претерпела изменений ни на поверхности, ни в толще воды (табл. 2), т.е. при существующих в канале глубинах турбулизирующее воздействие гребных винтов данного судна не вызывает существенного взмучивания ДО. Заметных изменений в содержании взвеси не выявлено и после прохода по каналу судна с осадкой, равной 5 м. Это может быть связано как с незначительным воздействием гребных винтов на дно канала, так и с тем, что измерения проводились в ветреную погоду, обусловившую повышенную фоновую концентрацию взвешенного вещества за счет ветроволнового взмучивания отложений.

Повышение концентрации взвеси, преимущественно в придонном слое, было зафиксировано после прохождения судна, имеющего осадку 5.7 м. На створе I в поверхностном слое концентрация взвеси увеличилась по сравнению с ее фоновыми значениями в среднем (по результатам двух съемок) в 1.2, у дна — в 1.6 раза (с 33 до 52 мг/л). Близкие по значению изменения в содержании взвеси зафиксированы также при пересечении судном створа II.

Измерения, выполненные при движении судна с осадкой 7.0 м, выявили весьма существенные изменения в содержании взвеси во всей толще воды. Так, если в поверхностном слое сразу после прохождения судном линии створа I концентрация взвешенного вещества увеличилась (в среднем для трех станций) в 1.4 раза, то в придонном — уже в 2.5 раза (с 30 до 77 мг/л). Аналогичная тенденция повышения концентрации взвеси была отмечена на створе II.

Наиболее значительные изменения концентрации взвешенного вещества обусловлены прохождением по каналу судна с осадкой 7.7 м (табл. 2). Затопленная свободная струя воды, выбрасываемая винтом данного судна, оказывает, по-видимому, максимальное воздействие на ДО, взмучивая их и обогащая взвешенными веществами не только придонный слой, но и всю водную толщу. На створе I концентрация взвеси при этом на поверхности увеличилась по сравнению с фоновыми значениями (в среднем для трех станций) в 2.8, у дна — в 4.2 раза (с 30 до 125 мг/л). Максимальное повышение концентрации взвеси (в 6 раз) зафиксировано в придонном слое на середине фарватера. На створе II содержание взвеси в поверхностном слое на середине фарватера увеличилось в 2, в придонном — в 4.7 раза (с 22 до 105 мг/л).

Отмеченные закономерности количественного состава взвеси, обусловленные движением судов различной осадки, характерны, в целом, как для середины фарватера, так и для бровок канала, ограничивающих его ширину. Отличие состоит в том, что на бровках повышение концентрации происходит с некоторой временной задержкой относительно ее повышения на середине фарватера. Так, максимальные содержания взвеси на станциях, расположенных на бровках канала, регистрировались не сразу после пересечения судном линии створа, а во время второго цикла съемки (т.е. через 20 мин) (табл. 2).

Это свидетельствует о том, что взвешенный материал, ремобилизованный под действием гребного винта из осадков на середине фарватера, постепенно распространяется по всей ширине канала. В то же время, достаточно высокая концентрация взвеси на бровках (иногда выше, чем на середине фарватера) позволяет предположить, что ДО на краях фарватера взмучиваются корабельными волнами, распространяющимися от проходящих судов.

Таблица 2. Концентрация взвешенного вещества, мг/л, на створах I и II после прохождения судов различной осадки (прочерк пробы не отбиралась)

Время, мин, между моментами пересечения судном линии створа и отбора проб	Створ I							Створ II		
	южная бровка (ст. 3)		середина фарватера (ст. 2)			северная бровка (ст. 1)		середина фарватера (ст. 6)		
	горизонт отбора проб – глубина, м									
	0	3.5	0	4.0	8.5	0	3.5	0	4.0	8.5
13.05, ветер СЗ, 3–5 м/с. Буксир “Зюйд”, осадка 1.2 м										
1–5	–	–	30.3	25.9	37.8	–	–	22.6	26.3	35.5
20–25	–	–	32.4	22.8	35.4	–	–	23.9	25.0	38.8
40–45	–	–	29.8	24.8	37.2	–	–	24.0	26.8	38.4
31.05, ветер СЗ, 4–5 м/с. Пассажирское судно “Колумбия”, осадка 5.7 м										
1–5	30.5	38.4	30.2	36.6	44.0	26.3	38.9	20.9	23.3	40.5
20–25	34.6	45.8	29.0	30.2	37.8	32.5	42.6	22.8	25.4	41.6
40–45	31.5	39.6	25.6	28.4	37.2	27.4	39.8	21.7	24.0	39.5
17.06, ветер З, СЗ, 3–4 м/с. Танкер “Oderstern”, осадка 7.0 м										
1–5	27.0	41.9	37.2	74.4	85.8	31.8	36.4	30.9	60.4	69.6
20–25	32.6	70.6	30.8	40.4	53.8	35.6	74.9	23.7	44.5	55.2
40–45	29.8	54.3	29.4	35.7	49.6	31.5	50.2	20.2	29.6	35.6
02.07, ветер СЗ, 3–4 м/с. Паром “Георг Оотс”, осадка 5.7 м										
1–5	40.6	38.7	55.6	60.9	63.4	40.8	36.7	53.2	58.9	62.0
20–25	49.6	55.7	53.5	54.8	60.4	53.6	60.8	42.0	32.3	43.0
40–45	44.4	40.2	42.4	49.5	57.4	41.7	42.3	37.5	30.9	39.5
06.07, ветер ЮЗ, 7–9 м/с. Контейнеровоз “Coastal sound”, осадка 5.0 м										
1–5	38.3	52.0	37.7	44.2	48.3	35.2	46.8	33.6	37.2	45.5
20–25	39.4	59.2	42.5	44.0	49.6	40.7	49.9	34.7	40.4	45.8
40–45	36.5	58.7	42.2	43.1	48.0	38.6	51.3	34.8	36.9	44.2
05.08, штиль. Танкер “Dicksi”, осадка 7.7 м										
1–5	45.5	48.0	73.3	96.1	210.2	65.3	73.3	33.6	80.2	105.9
20–25	49.9	77.5	60.6	90.3	98.4	58.4	86.6	33.8	54.5	87.4
40–45	41.4	50.8	48.2	49.4	84.5	40.8	61.4	23.5	44.7	70.3
60–65	32.5	41.4	36.4	38.9	49.5	29.7	45.3	19.7	29.5	28.8

Как видно из рис. 3, между величиной осадки проходящих судов и концентрацией взвешенного материала, поднятого ими, существует прямая зависимость, которая справедлива для участков канала с разными типами осадков. В случае наличия на дне слабоуплотненных, легко взмучивающихся илов (створ I) проход судов обеспечивает более высокую концентрацию взвешенных частиц, чем на участках с более грубыми песчанистыми отложениями (створ II). Так, для всех наблюдений, выполненных после прохождения судов, увеличение концентрации взвеси в толще воды на середине фарватера на створе I было в среднем на 38% больше, чем аналогичное увеличение на створе II, причем, на отдельных горизонтах, т.е. в поверхностном, промежуточном и придонном слоях, это увеличение кон-

центрации было больше на 36, 43 и 37% соответственно.

На прилегающих к каналу участках залива видимых изменений в содержании взвешенного материала непосредственно после прохода судов не выявлено. Таким образом, можно предположить, что проходящие по каналу суда не оказывают прямого влияния на перенос взвеси из канала в акваторию залива.

Оценка времени интегрального самоочищения за счет осаждения взвешенного вещества

Интересен, с точки зрения воздействия судоходства на состояние окружающей среды как в самом канале, так и в сопредельной акватории, вопрос о

времени нахождения во взвешенном состоянии частиц грунта, поднятых со дна в результате движения судов. Для оценки времени интегрального самоочищения вод от взвеси за счет ее осаждения был применен эмпирический подход, основанный на прямом определении концентрации взвеси на трех горизонтах сразу и спустя некоторое время после прохождения судном линии створа.

Оценки характерных времен “эффективного самоочищения” водной толщи от взвеси на участках канала с разными типами грунтов, вычисленных по формулам (2) и (3), представлены в табл. 3. Как видно, для участка с осадками, где доминируют более крупные частицы (створ II), время интегрального самоочищения $\Delta t_{90\%}$ составило ~30–40 мин, причем, для верхних горизонтов оно чуть меньше, чем для нижних. Такой результат обусловлен равномерным насыщением водной толщи взвешенными частицами примерно одинаковой размерности после прохода судна (в данном случае, преимущественно частицами мелкопесчаной и крупноалевритовой размерности) (табл. 4). При их осаждении первыми “очищаются” верхние горизонты, а осаждаемая из них взвесь поступает в нижние и определяет тем самым некоторое запаздывание процесса осаждения. При расчете по используемым формулам (2)–(3) это запаздывание выражается в увеличении времени интегрального самоочищения.

Для участка канала с илистыми ДО время интегрального самоочищения существенно больше (1.5–3 ч), так как осаждение взмученных мелкодисперсных частиц происходит медленнее. Примечательно, что в данном случае время осаждения частиц в поверхностном слое почти в два раза больше, чем в придонном. Причина этого парадокса кроется в том, что суда, проходящие по участку с илистыми грунтами, насыщают придонный горизонт как мелкими, так и крупными частицами (табл. 4), причем, крупные частицы в первую очередь “уходят” из взвешенного состояния из-за своей гидравлической крупности, быстро уменьшая тем самым общую концентрацию взвеси, в то время как тонкодисперсные частицы еще долго остаются во взве-

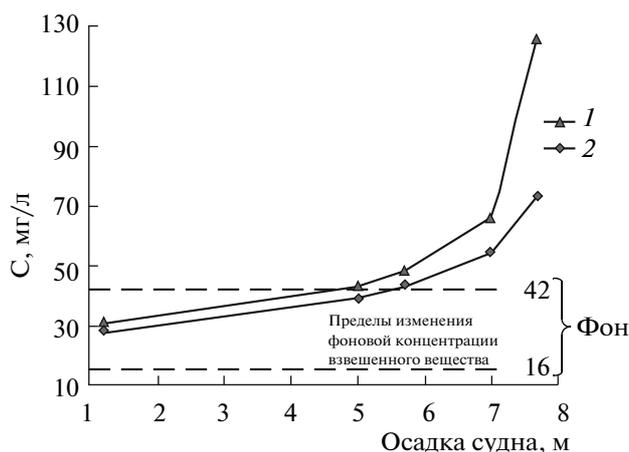


Рис. 3. Зависимость концентрации взвешенного вещества от величины осадки проходящего судна на участках КМК с различными типами ДО. 1 – створ I (илистые отложения); 2 – створ II (песчаные отложения).

шенном состоянии как в придонном, так и в поверхностном горизонтах.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показали, что фоновая концентрация взвеси в Калининградском морском канале выше (в среднем на 22–33%), чем в прилегающих участках залива. Ее величина в канале определяется совокупным воздействием естественных (речной сток, ветроволновое взмучивание ДО, продуцирование органического вещества) и антропогенных (регулярное движение судов) факторов, а в заливе – преимущественно естественными процессами.

Движение судов с осадкой <5 м не вызывает существенного превышения концентрации взвеси в канале ее фоновых значений. Проход судов с большей осадкой обеспечивает повышение концентрации взвеси по всей ширине фарватера канала с незначительной временной задержкой ее повышения на бровках и максимумом в районе центральной

Таблица 3. Оценки характерного времени интегрального самоочищения водной толщи от взвеси на участках КМК с разными типами грунтов

Номер створа, тип грунтов	Горизонт отбора проб – глубина от поверхности воды, м	Характерное время уменьшения концентрации взвешенных частиц в е (~2.57) раз τ , мин	Время интегрального самоочищения вод, равное времени снижения общей концентрации взвеси до 10% превышения над фоновым значением, $\Delta t_{90\%}$, мин
Створ I (илы мелкоалевритовые, алевритово-пелитовые)	0	71	164
	8.5	38	87
Створ II (пески мелко-зернистые, крупные алевриты)	0	12	27
	4.0	16	38
	8.5	18	42

Таблица 4. Гранулометрический состав ДО (0–7 см) и водной взвеси (придонный слой) на створах I и II, середина фарватера (числитель – фоновые значения, знаменатель – сразу после прохождения судна)

Район отбора проб		Гранулометрический состав, % (диапазон размеров – мм)							MD
		>0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	<0.005	
Створ I	ДО	2.2	2.6	12.3	25.7	28.5	8.7	19.6	0.034
	Водная взвесь	$\frac{1.4}{2.6}$	$\frac{1.6}{2.0}$	$\frac{2.7}{11.4}$	$\frac{4.8}{24.3}$	$\frac{22.4}{27.4}$	$\frac{45.4}{12.6}$	$\frac{22.0}{19.5}$	$\frac{0.008}{0.034}$
Створ II	ДО	1.2	4.3	39.2	45.5	6.2	2.2	1.4	0.096
	Водная взвесь	$\frac{1.9}{2.2}$	$\frac{2.2}{2.7}$	$\frac{3.3}{36.5}$	$\frac{12.4}{42.4}$	$\frac{38.0}{5.7}$	$\frac{25.4}{4.4}$	$\frac{17.6}{6.6}$	$\frac{0.012}{0.081}$

оси следования. При этом наблюдается прямая зависимость между величиной осадки судна и концентрацией взвеси, зарегистрированной после его прохода.

Проходя по участкам канала с различными типами грунтов, одно и тоже судно обуславливает на них неодинаковую величину концентрации взвеси. В районе распространения илистых отложений концентрация взвеси в толще воды, инициированная судами, в среднем на 38% больше, чем на участках с песчанистыми отложениями. После единичного прохождения судна стабилизация структуры воды по содержанию взвеси на участках с песчаными отложениями наступает в 3–6 раз быстрее, чем на участках с илистыми грунтами.

Приведенные в работе данные о фактических скоростях осаждения взвеси непосредственно после прохождения судов наряду с описанными методическими приемами можно использовать для оценки антропогенного воздействия на состояние окружающей среды в судоходных каналах, реках, водохранилищах.

Авторы выражают благодарность руководству Калининградского филиала ФГУ “Росморпорт” и администрации порта Калининград за всестороннюю помощь в организации и проведении работ, рецензентам – за подробный и конструктивный анализ и ценные замечания, позволившие в значительной степени улучшить качество статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А., Артюхин Ю.В. Геоэкология шельфа и берегов Мирового океана. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 304 с.
2. Безруков П.Л., Лисицын А.П. Классификация осадков современных водоемов // Тр. ИО АН СССР. 1960. Т. 32. С. 3–14.
3. Богданов Ю.А. Взвешенное органическое вещество в водах Тихого океана // Океанология. 1965. Т.5. Вып. 2. С. 286–297.
4. Богданов Ю.А., Лисицын А.П. Распределение и состав взвешенного органического вещества в водах Тихого океана // Океанологические исследования. 1968. № 18. С. 75–155.
5. Гидрометеорологический режим Вислинского залива / Под ред. Лазаренко Н.Н., Маевского А. Л.: Гидрометеоздат, 1971. 279 с.
6. Давыденко Л. Калининградский морской канал. Калининград: Калининградский печатный двор, 2001. 79 с.
7. Крылова О.И., Науменко Е.Н. Фитопланктон и первичная продукция Вислинского залива // Экологические рыбохозяйственные исследования в Вислинском заливе Балтийского моря: Сб. науч. тр. АтлантНИРО. Калининград, 1992. С. 14–33.
8. Латун В.В. Влияние функционирования судоходных каналов на экосистему Таганрогского залива. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону: РГУ, 2005. 20 с.
9. Лисицын А.П. Методы сбора и исследования водной взвеси для геологических целей // Тр. ИО АН СССР. 1956. Т. 19. С. 204–231.
10. Петелин В.Н. Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 129 с.
11. Сойфер В.Н., Жуков Ю.Н., Рубцов Н.П. Численная оценка воздействия судовых гребных винтов на донные осадки в зоне ядерной аварии в бухте Чажма // Метеорология и гидрология. 2003. № 3. С. 55–63.
12. Чечко В.А. Анализ пространственно-временной изменчивости взвешенного вещества Калининградского залива Балтийского моря // Вод. ресурсы. 2002. Т. 29. № 4. С. 425–432.
13. Чечко В.А. Процессы современного осадкообразования в Вислинском заливе Балтийского моря. Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. Калининград: РГУ, 2006. 23 с.
14. Чечко В.А., Чубаренко Б.В., Курченко В.Ю. Динамика концентрации водной взвеси в Калининградском морском канале в связи с движением судов и проведением дноуглубительных работ // Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геоэкология. Матер. конф. Калининград: Изд-во КГУ, 2004. С. 178–80.
15. Чикин А.Л., Чикина Л.Г. Заиление судоходных каналов в восточной части Таганрогского залива под влиянием ветровых течений: численный эксперимент // Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей и их побережий.

- Апатиты: Изд-во Кольск. НЦ РАН, 2007. Т. IX. С. 81–94.
16. Чубаренко Б.В. Зонирование Калининградского залива и устьевое участка реки Преголи по показателям гидролого-экологического состояния и в целях оптимизации мониторинга // Комплексное исследование процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. Апатиты: Изд-во Кольск. НЦ РАН, 2007. Вып. 2. С. 591–602.
 17. Чубаренко Б.В., Чечко В.А., Курченко В.Ю. Скорости осаждения взвеси в навигационном канале после прохождения судов // Физические проблемы экологии: Сб. науч. тр. М.: МАКС Пресс, 2007. № 14. С. 396–402.
 18. Шаповалов Е.Н., Ткалин А.В., Климова В.Л. Влияние дампинга грунтов на качество морской среды и биоту // Метеорология и гидрология. 1989. № 6. С. 82–87.
 19. Шевченко В.П., Филиппов А.С., Богунов А.Ю. и др. Геохимические исследования взвеси в маргинальном фильтре реки Северная Двина в конце зимнего периода // Вестн. Архангельского гос. техн. ун-та. Сер. Прикладная геоэкология. 2007. Вып. 70. С. 164–176.
 20. Chubarenko B., Chechko V., Kurchenko V. Suspended sediment studies in the Vistula Lagoon and its navigational canal // Sediment Transport in Rivers and Transitional Waters. Gdansk, 2005. P. 40–45.
 21. Chubarenko B.V., Chubarenko I.P. The transport of Baltic water along the deep channel in the Gulf of Kaliningrad and its influence on fields of salinity and suspended solids // ICES Cooperative research report / Eds. Dahlin H., Dybern B., Petersson S. 2003. V. 257. P. 151–156.
 22. Debolski V.K., Dolgoplova E.N., Orlov A.S. Influence of ship passage on the bottom sediments and process of silting spawning grounds of migratory fish // Proc. XX IAHR Congress. Moscow, 1983. V. 5. P. 580–586.