

УДК 551.468

ОСОБЕННОСТИ ШТОРМОВОЙ ЗАНОСИМОСТИ КАНАЛА МУДЬЮГСКИХ БАШЕН В МОРСКОМ ПОРТУ АРХАНГЕЛЬСК В УСТЬЕ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ

© 2022 г. С. М. Иглин¹, *, А. М. Алабян², В. Б. Коробов³, **¹ФГУП “Росморпорт”, Москва, Россия²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: iglin.sm@bk.ru

**e-mail: szoioran@mail.ru

Поступила в редакцию 08.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 16.12.2021 г.

Судоходные каналы морского порта Архангельск, находящегося в устьевой области реки Северной Двины, оказывают существенное влияние на природные процессы, протекающие на ее акватории. Наиболее крупными такими объектами являются судоходные каналы, в которых регулярно проводятся дноуглубительные работы. В свою очередь, акватория каналов подвергается отложениям наносов. Наибольшей заносимости из-за штормовых явлений подвержена акватория канала Мудьюгских башен, который и рассмотрен в настоящей работе. Для оценки величины штормовой заносимости на фактическом материале получены статистические зависимости объемов переносимого грунта и энергетическими характеристиками штормов. Установлено, что зависимость между объемами штормовых наносов и энергетическими показателями шторма (средняя скорость, длительность, направление ветра) имеет линейный характер, при этом среднее значение коэффициента корреляции для всего канала составило 0.94. Эффективность прогноза объемов штормовых наносов подтверждается значениями критериев NSE (0.89) и эффективности прогнозирования S/σ (0.31) в среднем для всего канала. Объемы заносимости, рассчитанные по предложенной методике, превышают в среднем фактические на 19%, что является приемлемым для планирования дноуглубления и принятия управленческих решений.

Ключевые слова: штормовые наносы, судоходный канал, Северная Двина, дноуглубление

DOI: 10.31857/S0030157422040037

Высокие темпы развития морской транспортной инфраструктуры на севере России подразумевают строительство новых и реконструкцию существующих судоходных путей для возможности подхода крупнотоннажных судов к морским портам и увеличения грузооборота в Арктике. Одним из важнейших элементов морских портов являются подходные каналы, проходящие через акватории с недостаточными для прохода судов глубинами. Заносимость каналов (объем поступающих наносов в единицу времени) существенно влияет на экономическую эффективность транспортного узла и является важным показателем при проектировании (расчет запаса на заносимость) и эксплуатации (планирование ремонтных дноуглубительных работ) морских каналов [30, 32].

Наиболее проблемными с точки зрения накопления наносов являются морские подходные

каналы, располагающиеся в устьевых областях рек в зонах смешения речных и морских вод [5, 7, 13, 33, 34]. Такие каналы проходят через мелководные баровые области, сформированные отложениями выносимого рекой твердого вещества, и окружены обширными мелководьями на всей их протяженности [23]. С одной стороны, они подвергаются существенным процессам аккумуляции речных наносов, особенно после прохождения весеннего половодья. С другой стороны, важнейшим процессом является взмучивание и перемещение грунтов из мелководных зон за бровками канала в ходе штормов, приводящее к накоплению донных наносов в морских подходных каналах [8, 12, 40, 42].

Морфодинамические процессы формирования рельефа морского дна во время штормов обусловлены комплексным взаимодействием системы “атмосфера–гидросфера–литосфера”, имеют

сложную и многокомпонентную структуру и обуславливаются взаимодействием нескольких компонентов, в первую очередь, течений [18, 25, 39]. Но моделирование одних только течений в приливном устье Северной Двины представляет собой трудоемкую техническую задачу [17, 38], а подключение к гидродинамической модели блоков расчета транспорта наносов и русловых деформаций требует обоснованного выбора расчетной зависимости для транспортирующей способности потока [39].

Теоретическое решение задач, связанных с расчетом и прогнозом транспорта наносов в ходе шторма, подразумевает многочисленные упрощения и, как следствие, ввод дополнительных гипотез. При этом результаты моделирования имеют, как правило, приближенный характер и могут существенно отличаться от экспериментальных данных [11, 28]. Математический аппарат, используемый как для прогнозирования штормовых процессов, так и при моделировании движения наносов достаточно сложен для практических расчетов. Кроме того, для его применения в условиях эксплуатации путей морских сооружений требуются материалы комплексных инженерных морских изысканий, оперативное получение которых часто представляется затруднительным. В то же время, в случаях, когда на этапе эксплуатации канала проводится регулярная актуализация глубин после штормов, для расчета и прогноза заносимости могут быть использованы полуэмпирические зависимости, основанные на статистических связях параметров уменьшения габаритов канала с характеристиками штормовых событий [14].

В морском порту Архангельск гидрографические и дноуглубительные работы проводятся ежегодно в течение безледного периода (май–ноябрь), что позволяет использовать накопленные данные для разработки такого рода зависимостей. Порт расположен в устьевой области реки Северной Двины, частью которой является устьевое взморье и обширная дельта со сложной русловой сетью, состоящей из нескольких крупных рукавов и множества протоков, их соединяющих. Формирование рельефа дна устьевого взморья Северной Двины определяется в основном стоком воды и наносов, а также морским волнением [19]. Гидродинамический режим взморья и водотоков дельты осложнен действием неправильных полусуточных приливов, амплитуда которых в сизигию может превышать 1 м. Реверсивные приливные течения обуславливают формирование обширной зоны смещения речных и морских вод, смещающейся в сторону реки или моря в зависимости от фазы водности реки и интенсивности сгонно-нагонных явлений в Двинском заливе [2, 21]. Эти особенности гидродинамического режима акватории формируют локальные зоны с обособ-

ленными гидрохимическими и гидрофизическими характеристиками, могут существенно определять специфику рельефа и литодинамику речного и морского дна [16, 20, 22, 24, 35, 37, 41].

Заносимость главного судового хода к порту Архангельск из Двинского залива Белого моря весьма существенна, причем наиболее проблемным участком является канал Мудьюгских башен – северные 9.5 км судового хода (рис. 1), где ее значения могут достигать до 1 млн. м³ в год. Деформация дна взморья носит сезонный характер: наиболее интенсивно донный рельеф изменяется осенью в период штормовых ветров северо-западного направления [9]. Шторма с северо-западным направлением ветра, когда разгоны наибольшие и ветровые волны достигают максимальных размеров, переносят колоссальные объемы донного грунта. Так, после шторма в ноябре 2011 г., продолжавшегося 4 суток, в течение которых скорость ветра не опускалась ниже 16 м/с, были зафиксированы максимальные значения слоя аккумуляции наносов, достигавшие 3 м. Такие деформации морского дна в судоходном канале влияют на безопасность мореплавания и требуют оперативного проведения дноуглубительных работ.

Целью работы является установление связи между характеристиками штормов и объемом наносов, поступающих в канал, и на ее основе разработка методики, позволяющей по гидрометеорологическим параметрам штормов производить оперативные расчеты, прогнозировать объемы землечерпания и оптимизировать работу земснарядов в акватории Мудьюгского канала морского порта Архангельск.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой для разработки модели послужили данные съемок рельефа дна (СРД) Мудьюгского канала, выполненные в период с 2011 по 2020 гг. Архангельским филиалом ФГУП “Росморпорт”, представляющие собой цифровую модель рельефа (ЦМР) в ASCII формате с размерами ячеек 1 м.

Гидрографические работы были выполнены автоматизированным гидрографическим комплексом на базе однолучевого эхолота Odom CV300 в период с 2011–2014 гг. и многолучевого эхолота Kongsberg EM3002 в периоды с 2014–2020 гг. Использована система координат WGS-84, проекция UTM37N, высотные отметки соответствовали нулю порта Архангельск (–1.083 м в Балтийской системе высот 1977 г.).

Цифровые модели рельефа (ЦМР) позволяли выполнить расчет объемов донного грунта, необходимых для изъятия с целью восстановления навигационных габаритов канала. Вычисления объемов производились в модуле “EarthWorks Re-

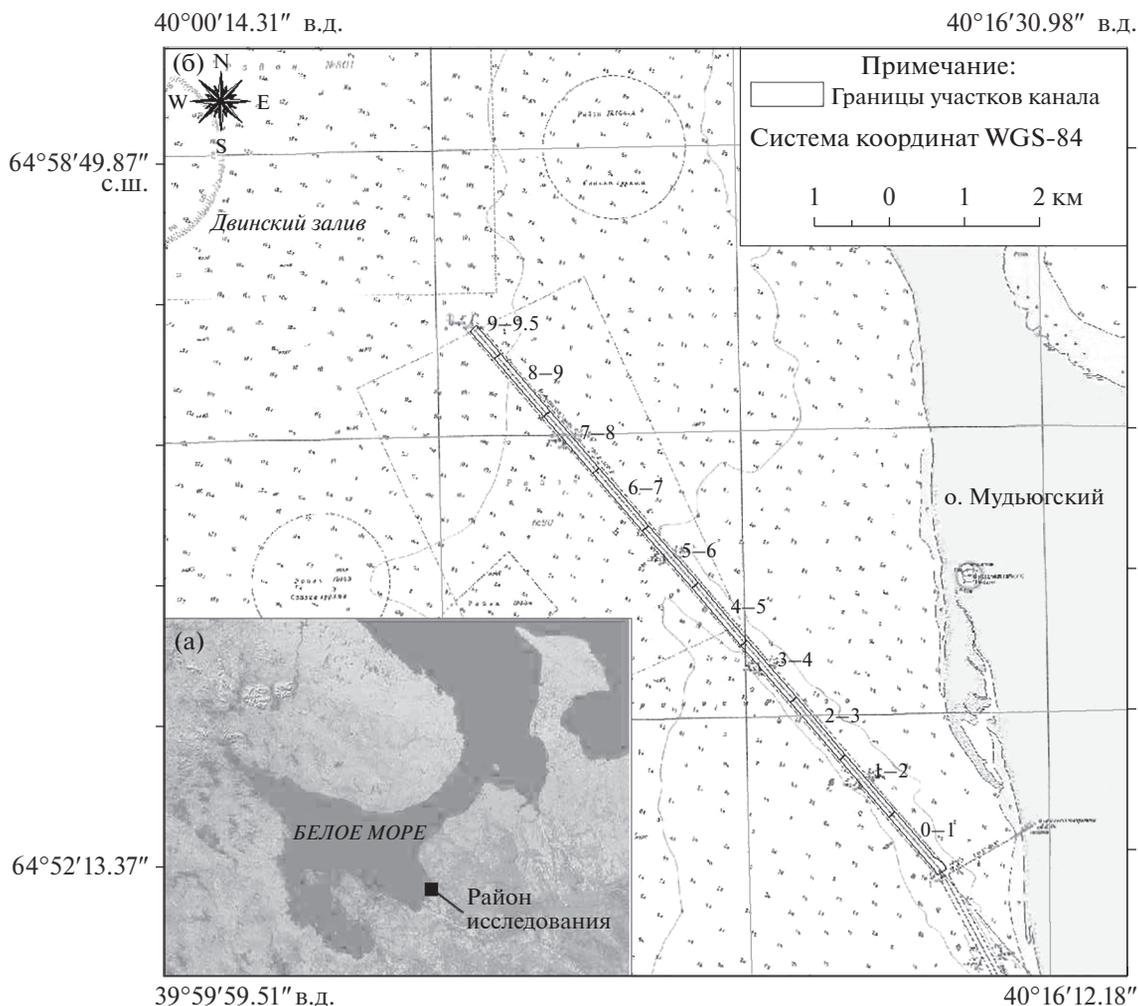


Рис. 1. Схема расположения объекта исследования (а – в акватории Белого моря, б – в акватории Двинского залива).

ports” программного пакета “Trimble Terramodel”. Подсчет объемов грунта выполнялся в границах акватории канала Мудьюгских башен в соответствии с “Обязательными постановлениями Капитана порта Архангельск” на проектную глубину 10.3 м. Выполненные гидрографические исследования и примененные методы подсчета объемов соответствовали актуальным нормативным, техническим и регламентирующим документам: “Правила гидрографической службы № 4. Съёмка рельефа дна. Часть 1. Основные положения. Часть 2. Требования и методы”; “Правила гидрографической службы № 35. Приведение глубин к уровню”; РД 31.74.04-2002 “Технология промерных работ при производстве дноуглубительных работ и при контроле глубин для безопасности плавания судов в морских портах и на подходах к ним”; “Методика обработки материалов обследования при использовании автоматизированных гидрографических комплексов от 05.05.2003 г.”; “Методика по использованию спутниковых на-

вигационных систем при производстве гидрографических работ от 10.07.2002 г.”; РД 31.74.08-94 “Техническая инструкция по производству морских дноуглубительных работ”.

Расчет заносимости канала в ходе шторма X_1 , м³ выполнялся исходя из соотношения:

$$X_1 = X_3 - X_0 + X_2, \quad (1)$$

где: X_0 – объем грунта к выемке в канале до шторма, м³; X_2 – объем дноуглубительных работ, выполненных между съемками, м³; X_3 – объем грунта к выемке в канале после шторма, м³.

Значения X_0 и X_3 рассчитывались по разновременным ЦМР дна (рис. 2), значения X_2 принимались исходя из ежедневных отчетов земснарядов.

Если исходить из устоявшегося положения, что объем заносимости X_1 зависит от ветроволновой энергии шторма [31], а энергия шторма в наи-

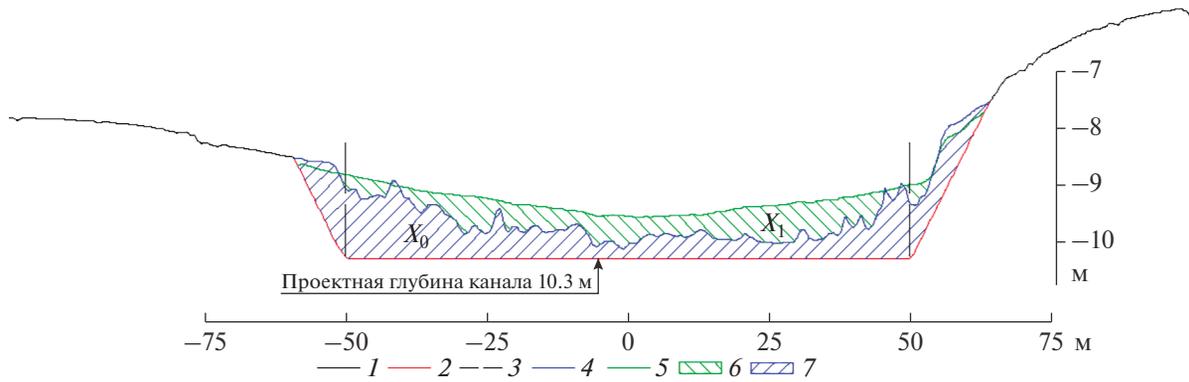


Рис. 2. Пример накопления наносов в поперечном сечении канала Мудьюгских башен после шторма (5–7 июля 2015 г.) при северо-западном ветре со средней скоростью 14 м/с. 1 – естественное положение рельефа дна, 2 – проектные габариты канала, 3 – навигационные габариты канала – границы подсчета объемов, 4 – поверхность канала до шторма 25.06.2015 г., 5 – поверхность канала после шторма 15.07.2015 г., 6 – заносимость канала в ходе шторма X_1 , 7 – объемы грунта в канале до шторма X_0 .

более упрощенном варианте зависит от длительности шторма T , скорости ветра V и разгона волны D , она может быть охарактеризована энергетическим показателем E , определяемым как их произведение

$$E = TVD. \quad (2)$$

При этом значения V и D могут возводиться в степень, отличную от единицы [15, 31]. Нами на первом этапе исследований эти зависимости принимались линейными, в целях упрощения практических расчетов длительность шторма T выражалась в сутках, длина разгона – в километрах и средняя за период шторма скорость ветра – в метрах в секунду. Для удобства пространственного анализа штормовой заносимости акватория канала Мудьюгских башен была разделена на участки длиной по 1 км (последний, самый северный участок имел длину 500 м) и шириной 100 м (что соответствует ширине канала по дну).

Данные о гидрометеорологических параметрах шторма (направление, скорость ветра, длительность) получены из открытых интернет-ресурсов с архивами погоды по метеостанции Мудьюг (№ 22551) [3, 4, 29] и по оперативным данным Росморпорта, полученным непосредственно с земснарядов.

Значения разгона волны D для основных 8 румбов направления ветра определялось как расстояние от участка канала до берега по навигационным морским картам (табл. 1).

Принимая во внимание ранее установленную закономерность [10], что чем ближе эксплуатационные габариты канала к проектным, тем больше будет штормовая заносимость (за счет большего объема свободного пространства), степень заполненности канала наносами также должна быть принята во внимание. Влияние грунта, находящегося в канале до шторма (X_0), на заносимость

можно выразить через коэффициент заполненности канала наносами m :

$$m = 1 - \left(\frac{X_0}{X'_0} \right), \quad (3)$$

где: m – коэффициент заполненности канала наносами, X_0 – объем грунта к выемке в канале до шторма, X'_0 – объем максимальной заносимости до полной заполненности канала (рис. 2).

При таком выражении, чем больше грунта находится в канале перед штормом, тем меньше будет значение штормовой заносимости. Применение коэффициента m может позволить скорректировать прогнозируемые объемы штормовой заносимости в ситуации, когда габариты канала близки к проектным и потенциальные объемы заносимости максимальны. Если же в канале уже находится грунт, то он будет снижать объемы

Таблица 1. Значения разгонов волны D (км) для участков канала Мудьюгских башен при различных направлениях ветра

Участок канала, км	С	СЗ	СВ	З	В	ЮЗ	ЮВ	Ю
0–1	1.8	225.7	0.8	102.0	1.0	43.0	1.8	9.3
1–2	7.9	224.7	1.1	104.2	1.1	49.4	2.2	12.5
2–3	7.9	224.2	1.9	106.4	1.4	49.5	2.2	13.4
3–4	11.9	222.9	3.0	107.2	1.8	49.8	4.6	13.4
4–5	14.7	221.7	3.9	108.0	2.7	50.1	5.6	13.9
5–6	15.3	220.8	4.6	107.9	3.4	50.3	6.4	14.7
6–7	15.5	219.5	4.9	108.5	4.1	50.7	6.8	15.6
7–8	15.3	212.2	5.4	108.9	4.7	50.7	7.3	16.9
8–9	15.4	217.2	5.1	108.8	5.3	50.5	8.1	17.7
9–9.5	15.0	215.9	5.6	109.3	5.7	50.5	9.1	18.8

Таблица 2. Расчетные значения объема максимальной заносимости X'_0 секций канала до полной заполненности наносами

Участок канала	$X'_0, \text{м}^3$
0–1	322541
1–2	274861
2–3	266787
3–4	318440
4–5	324800
5–6	306406
6–7	231870
7–8	156019
8–9	99399
9–9.5	22659

штормовой заносимости за счет выполаживания его боковых откосов.

Значения X'_0 рассчитывались по данным СРД путем удаления из ЦМР точек, лежащих внутри контура акватории канала, и последующей интерполяции глубин между точками, находящимся у его верхних бровок (табл. 2). Существенное различие в величине данного показателя обусловлено вариациями “фоновых” глубин акватории, через которую проходит канал.

Дальнейшие исследования были направлены на поиски связи объемов заносимости X_1 от величины показателей E и Em для каждой секции канала и для каждого штормового события в виде:

$$X_1 = f_1(E), \quad (4)$$

$$X_1 = f_2(Em). \quad (5)$$

Они выполнялись посредством построения однофакторных линейных регрессионных уравнений вида $y = a_1E$ и $y = a_2Em$ в программе Microsoft Excel.

Было проанализировано 90 файлов ЦМР дна и данные о 56 штормовых событиях со скоростью ветра в диапазоне от 10 до 26 м/с и длительностью от 1 до 4 суток. Ряды наблюдений для каждого участка были разделены по хронологии на равные по числу членов основную и проверочную группы. Основная группа использовалась для получения зависимостей, а проверочная – для их верификации на независимом материале.

Оценка тесноты связи для основной и проверочной группы была выполнена путем расчета средней абсолютной ошибки (разницы между рассчитанными и фактическими значениями) и коэффициентов корреляции рядов рассчитанных и фактических значений. Качество прогноза для

проверочной группы определялось критерием Нэша-Сатклиффа (NSE) [43] и критерием эффективности прогнозирования S/σ [27].

Критерий эффективности модели Нэша-Сатклиффа (NSE) сравнивает сумму абсолютных квадратов разностей между прогнозными и наблюдаемыми значениями с дисперсией наблюдаемых значений заносимости в течение периода анализа:

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X'_{li} - X_{li})^2}{\sum_{i=1}^n (X'_i - \bar{X}'_1)^2}, \quad (6)$$

где X'_{li} – рассчитанное значение штормовой заносимости, X_{li} – фактическое значение штормовой заносимости, \bar{X}'_1 – осредненное значение фактической заносимости за период моделирования.

Методика прогноза считается эффективной при значениях критерия Нэша-Сатклиффа между 0.50 и 1.0 (градация эффективности следующая: $0.75 < \text{NSE} \leq 1.0$ – очень хорошо, $0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$ – хорошо, $0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$ – удовлетворительно, $0.40 < \text{NSE} \leq 0.50$ – допустимо, $\text{NSE} \leq 0.40$ – недопустимо) [36].

Кроме того, был рассчитан критерий эффективности прогнозирования S/σ (7), (8):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{li} - X'_{li})^2}{n - m}}, \quad (7)$$

где S – средняя квадратическая погрешность проверочных прогнозов, X'_{li} – рассчитанное значение штормовой заносимости, X_{li} – фактическое значение штормовой заносимости, n – число прогнозов, m – число степеней свободы равно числу постоянных коэффициентов в уравнении;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X'_{li} - \bar{X}'_1)^2}{n - 1}}, \quad (8)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение прогнозируемого значения от среднего, X_{li} – рассчитанное значение штормовой заносимости, \bar{X}'_1 – осредненное значение рассчитанной заносимости за период моделирования, n – число прогнозов.

Погрешности определения S и σ зависят также и от числа прогнозов n , поэтому установлены следующие условия применимости методик прогнозирования: при $n \leq 15$ – $S/\sigma \leq 0.70$, $15 < n < 25$ – $S/\sigma \leq 0.75$, $n \geq 25$ – $S/\sigma \leq 0.80$) [27].

Таблица 3. Статистические характеристики регрессионных моделей основной и проверочной группы наблюдений штормовой заносимости канала Мудьюгских башен от энергетического показателя E

Участок	Основная группа				Проверочная группа				
	уравнение связи	n	r	средн. $ X_1 \text{ расч} - X_1 \text{ факт} , \text{ м}^3$	n	r	NSE	S/σ	средн. $ X_1 \text{ расч} - X_1 \text{ факт} , \text{ м}^3$
0–1	$X_1 = 2.034E$	9	0.99	1190	9	0.98	0.93	0.27	1251
1–2	$X_1 = 3.147E$	10	0.93	4030	9	0.96	0.93	0.31	2298
2–3	$X_1 = 4.155E$	9	0.90	7810	8	0.94	0.85	0.39	3638
3–4	$X_1 = 4.388E$	13	0.96	3260	12	0.97	0.92	0.29	3174
4–5	$X_1 = 5.868E$	12	0.98	2820	12	0.94	0.84	0.40	4834
5–6	$X_1 = 6.688E$	16	0.92	7802	15	0.93	0.86	0.38	8087
6–7	$X_1 = 7.437E$	14	0.87	12188	15	0.92	0.84	0.40	10099
7–8	$X_1 = 4.818E$	8	0.97	4411	8	0.93	0.79	0.46	3122
8–9	$X_1 = 7.948E$	7	0.99	1808	6	0.99	0.98	0.13	1986
9–9.5	$X_1 = 1.988E$	5	0.78	2250	5	0.98	0.89	0.33	1272

Коэффициенты корреляции рассчитывались по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{li} - \bar{X}_l)(X'_{li} - \bar{X}'_l)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{li} - \bar{X}_l)^2 \sum_{i=1}^n (X'_{li} - \bar{X}'_l)^2}}. \quad (9)$$

Погрешности определения S и σ зависят также и от числа прогнозов n , поэтому установлены следующие условия применимости методик прогнозирования: при $n \leq 15 - S/\sigma \leq 0.70$, $15 < n < 25 - S/\sigma \leq 0.75$, $n \geq 25 - S/\sigma \leq 0.80$ [27].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения функциональных зависимостей и их статистических характеристик представлены в табл. 3.

Значения коэффициентов корреляции для основной группы наблюдений, находятся в диапазоне от 0.78–0.99, а для проверочной группы 0.92–0.99, что говорит о высоком качестве прогноза и о тесной линейной зависимости. Это не вполне согласуется с распространенным мнением о нелинейности данной связи [15, 31]. В то же время линейная связь интенсивности транспорта наносов с энергетическими показателями водного потока вполне характерна для эмпирических зависимостей, полученных для крупных равнинных рек [2].

Значения средней абсолютной ошибки для основной и проверочной группы оказались близки по значениям и в среднем отличаются на 1300 м^3 ,

что является приемлемым значением для априорной оценки. Повышенные значения средних абсолютных ошибок на участках 2–3, 5–6, 6–7 связаны с высокими фактическими объемами заносимости, но даже здесь в относительном выражении они не превышают 18%.

Полученные для основной группы зависимости были верифицированы на проверочной группе наблюдений. Критерий качества прогноза Нэша-Сатклифа (NSE) не опускался ниже 0.79, что говорит о высоком качестве прогноза. Рассчитанные значения S/σ находятся в диапазоне от 0.13 (на участке 8–9 при $n = 6$) до 0.46 (на участке 7–8 при $n = 8$), что существенно меньше порогового значения и свидетельствует о высокой эффективности прогноза.

Линейная зависимость штормовой заносимости от величины энергетического показателя E , а также практически совпадающая теснота связи фактических и расчетных значений для основной и проверочной группы хорошо иллюстрируется графически (рис. 3).

Сравнение качества прогноза штормовой заносимости в зависимости от использования предикторов в виде E или Em выполнялись для проверочных групп на каждом участке канала Мудьюгских башен (табл. 4).

В то время как использование обоих предикторов демонстрирует высокую эффективность прогноза по обоим критериям, некоторое преимущество имеет использование Em , для которого средняя и особенно максимальная ошибка в абсолютном выражении существенно меньше. С учетом того, что ветра западных направления (СЗ, З, ЮЗ) имеют наибольшую ветроволновую энергию, следу-

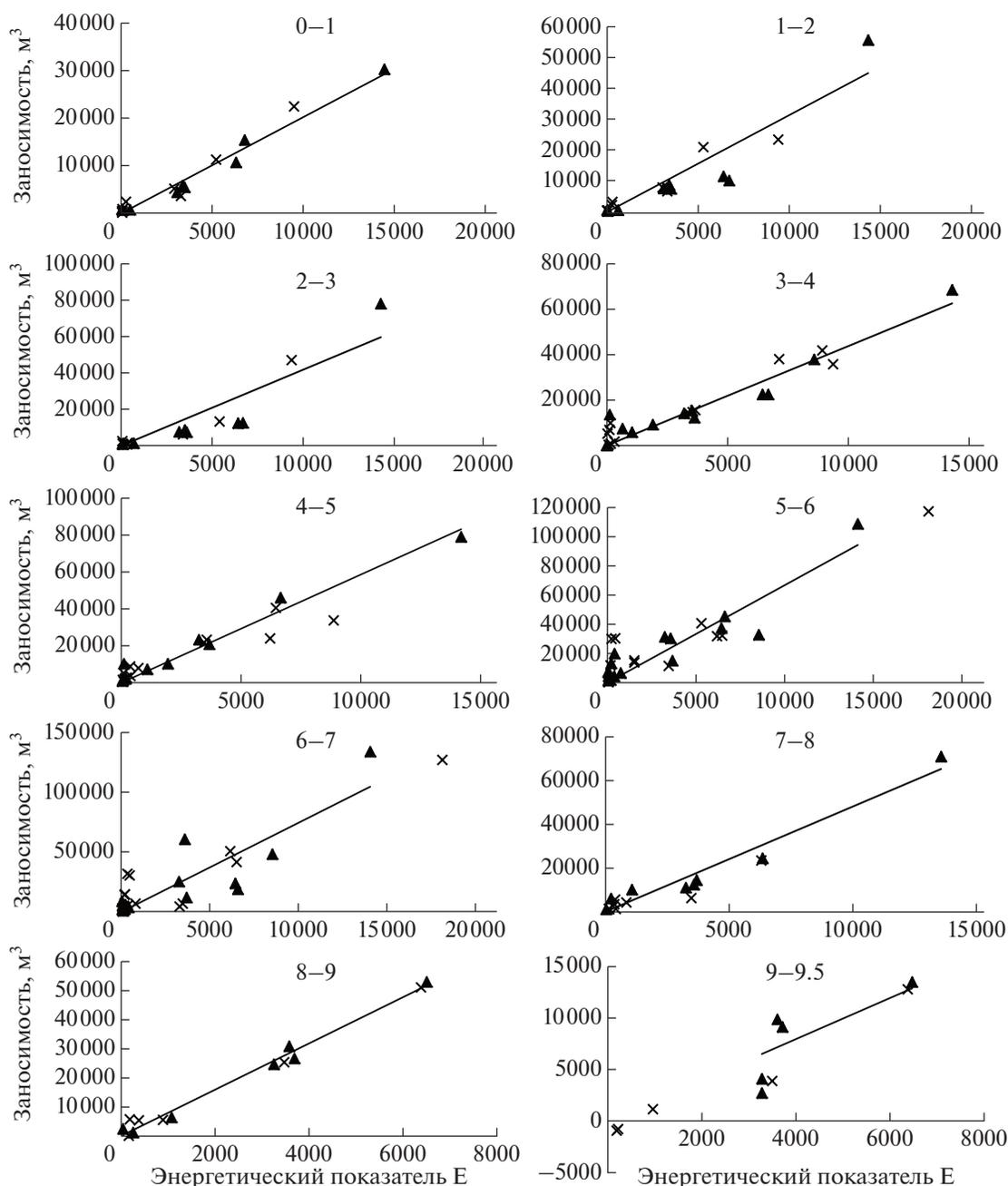


Рис. 3. Функциональные зависимости объемов штормовой заносимости от энергетического показателя E (в условных единицах) на участках канала Мудьюгских башен в порту Архангельск (▲ – основная группа, × – проверочная группа).

ет, что чем более пологим является откос канала с западной стороны, тем меньшее влияние будет оказывать коэффициент m на расчеты штормовой заносимости. Принимая во внимание производительность земснарядов (TSHD 2000 “Белое море”, “Северная Двина”), которая составляет от 8–10 тыс. м³ в сутки, величины максимальной разницы на участках 4–5, 5–6, 6–7 значительно меньше (на 3.2, 3.1 и 5.1 тыс. м³ соответственно) при прогнозировании от Em . Поэтому при нали-

чии данных о предварительной заполненности канала наносами для прогнозирования штормовой заносимости предпочтительнее использовать предиктор Em .

Сопоставление расчетных и фактических значений заносимости Мудьюгского канала (рис. 4) показывает, что рассчитанные значения в среднем превысили фактические на 15.9% при использовании показателя Em и на 18.4% при использовании показателя E , что в обоих случаях

Таблица 4. Статистические характеристики регрессионных моделей штормовой заносимости от E и Em на канале Мудьюгских башен в порту Архангельск

Участок	Группа	Средн. $ X_1\text{расч} - X_1\text{факт} $	Макс. $ X_1\text{расч} - X_1\text{факт} $	NSE	S/σ
0–1	E	1251	3291	0.93	0.27
	Em	1334	2650	0.92	0.29
1–2	E	2298	6085	0.93	0.31
	Em	2399	4413	0.89	0.34
2–3	E	3638	9248	0.85	0.39
	Em	2873	7061	0.91	0.29
3–4	E	3174	9220	0.92	0.29
	Em	3044	9509	0.87	0.36
4–5	E	4834	18229	0.84	0.40
	Em	4636	15030	0.85	0.39
5–6	E	8087	28433	0.86	0.38
	Em	7178	25367	0.83	0.39
6–7	E	10099	29162	0.84	0.40
	Em	8055	24040	0.76	0.44
7–8	E	3122	10477	0.79	0.46
	Em	2685	8887	0.82	0.42
8–9	E	1986	4249	0.98	0.13
	Em	1895	4089	0.98	0.13
9–9.5	E	1272	3052	0.89	0.33
	Em	1114	2831	0.82	0.42

является вполне приемлемым для оперативного расчета и прогнозирования объемов аккумуляции наносов в канале и планирования работы земснарядов.

Пространственное распределение аккумуляции наносов неоднородно по длине канала. Максимальной заносимости подвержены его участки 4–7 и 8–9 км. Это обуславливается в первую очередь особенностями морфологии забровочных пространств канала и неоднородностью распределения мелководных областей.

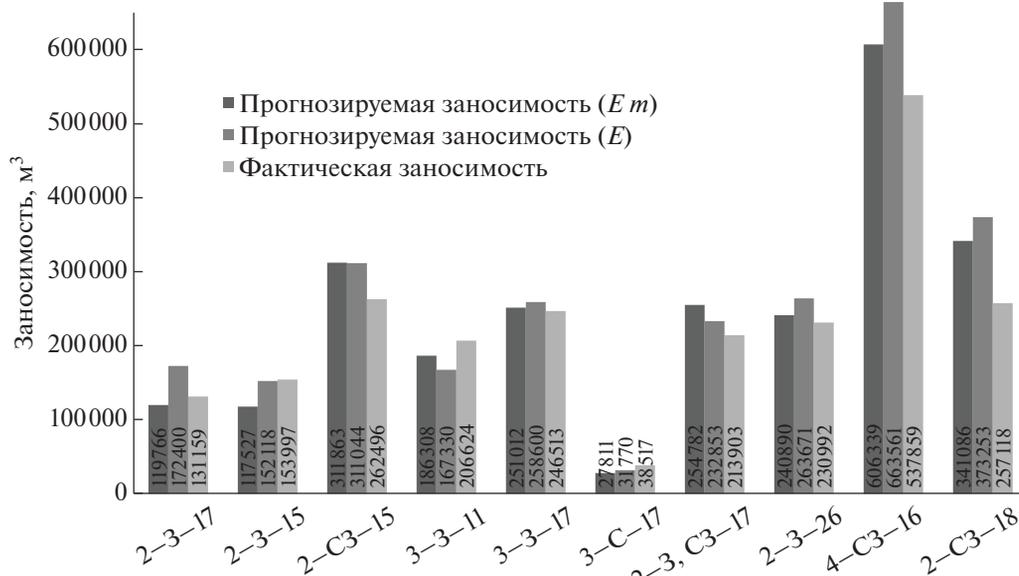
Подводные отвалы грунта также становятся дополнительным источником наносов, взвешенный донный грунт, ранее удаленный из канала, переносится волновыми и вдольбереговыми течениями, тем самым создавая потенциальную возможность обратной заносимости (близость отвала № 143а к участку 5–7 км, № 144а – к 8–9 км) [6].

Наибольший вклад в процесс заносимости вносят шторма с ветрами северо-западных, западных и юго-западных направлений (рис. 6), что обусловлено значительной отдаленностью берега – увеличением разгонов, и, соответственно, возможностью возникновения волны большей высоты [1].

Численная оценка распределения штормовых наносов в безледный период выполнена по справочным данным повторяемости скорости и направления ветра по месяцам в Двинском заливе Белого моря [26] (рис. 7) и может быть использована при планировании работ и расстановки дноуглубительного флота в течение года.

Полученная оценка совпадает с тенденцией распределения аккумуляции штормовых наносов в канале в течение года [12]. Штормовая заносимость и деформации рельефа дна существенно зависят от повторяемости ветров: наибольшие объемы аккумуляции наносов наблюдаются в осенние месяцы, что обуславливается высокой интенсивностью ветров западного и северо-западного направления. В летнюю межень влияние штормовых ветров на объемы аккумуляции наносов в канале заметно снижается.

К неучтенным факторам, определяющим объемы аккумуляции наносов, можно отнести повышенный твердый сток реки в период весеннего половодья, когда речные наносы оседают в баровой области устьевого взморья. Между съемками рельефа дна в периоды с мая по июнь после штормов помимо заносимости, вызванной волнением, будет отмечаться осаждение тонкодисперсных



Параметры штормов: Длительность, сут – Направление ветра – Скорость ветра, м/с

Рис. 4. Прогнозная и фактическая заносимость канала Мудьюгских башен в зависимости от параметров шторма: длительность (сут.) – направление ветра – скорость ветра (м/с). 1 – прогнозируемая заносимость (E_m), 2 – прогнозируемая заносимость (E), 3 – фактическая заносимость.

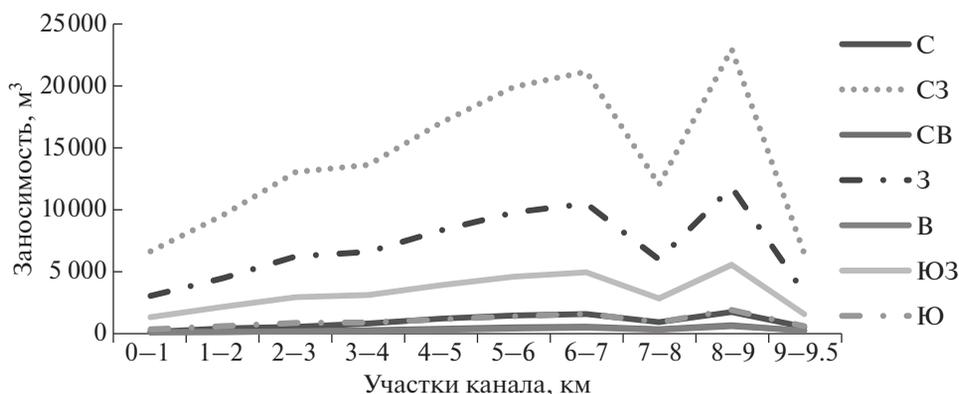


Рис. 5. Рассчитанные значения заносимости по длине канала после однодневного шторма при разных направлениях со скоростью ветра 15 м/с?

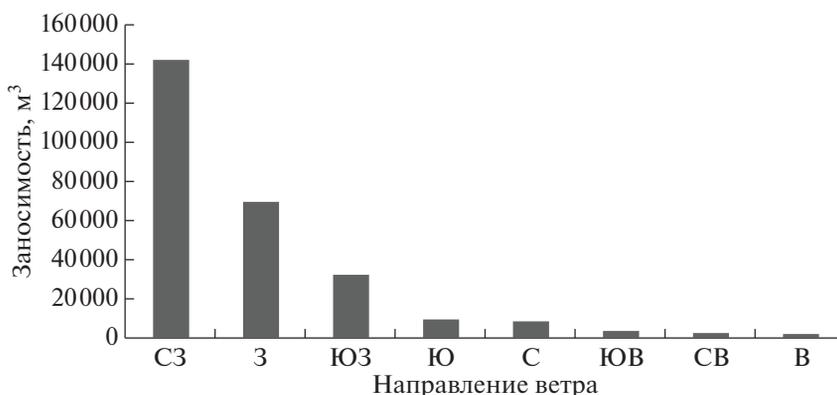


Рис. 6. Рассчитанные значения заносимости канала после однодневного шторма со скоростью ветра 15 м/с в зависимости от направления ветра.

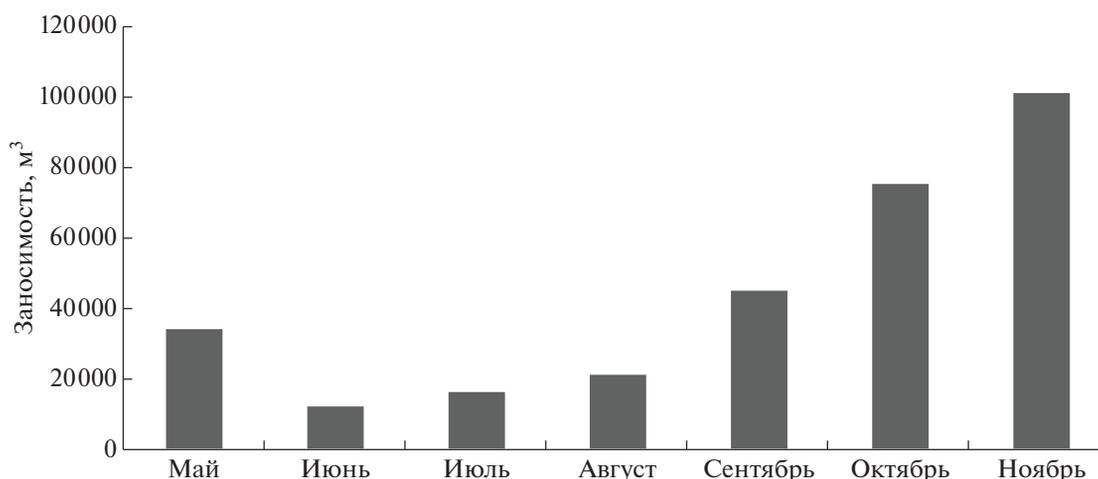


Рис. 7. Рассчитанная штормовая заносимость канала Мудьюгских башен в безледный период.

фракций грунта, переносимых стоковым течением, однако, численно выделить это соотношение без гидрологических изысканий и моделирования пока не представляется возможным. Одним из перспективных направлений дальнейших исследований представляется инкорпорация блока транспорта наносов в математическую модель устьевой области Северной Двины [17, 38] и вынесение ее нижней (морской) границы за пределы акватории канала Мудьюгских башен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зависимость между энергетическими показателями ветроволновой активности и объемами штормовой заносимости канала имеет линейный характер, при этом среднее значение коэффициента корреляции (для всей акватории канала) составляет 0.94.

Эффективность прогноза дополнительно подтверждается значениями критериями Нэша-Сатклиффа (NSE) и эффективности прогнозирования S/σ в среднем для всего канала 0.89 и 0.31 соответственно. Рассчитанные значения объемов наносов в ходе шторма для всего канала превышают фактические не более, чем на 19%, что приемлемо для оперативного принятия управленческих решений и планирования дноуглубительных работ.

Ветра западных румбов несут наибольшую ветроволновую энергию за счет удаленности берега и возможности возникновения волны большей высоты, а соответственно и объемов штормовых наносов.

Пространственное распределение штормовых наносов вдоль Мудьюгского канала неравномерно, наиболее заносимые участки находятся на 4–7 и 8–9 км ввиду особенностей морфологии за-

бровочных пространств канала, неоднородности распределения мелководных областей, а также близости подводных отвалов грунта.

Распределение объемов штормовых наносов во времени также неравномерно в течение года и во многом обуславливается повторяемостью ветров северо-западного направления, которое отмечается в осенние месяцы.

Применение предлагаемой методики прогноза штормовой заносимости канала Мудьюгских башен позволяет усовершенствовать планирование дноуглубительных работ: оценивать по гидрометеорологическим факторам прошедшего шторма объемы заносимости в случае непосредственной невозможности проведения гидрографических работ, проводить оперативное перемещение земснарядов по профилю канала.

Использование данной методики возможно для оценки заносимости других морских каналов, находящихся в мелководных баровых областях приливных устьев рек, подверженных влиянию штормовых ветров, таких как морские порты Нарьян-Мар, Онега, Беломорск и другие, расположенные в морях Северного Ледовитого океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абузаров З.К., Лукин А.А., Нестеров Е.С. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях. М.,: Гидрометеорологический науч.-исслед. центр Российской Федерации, 2013. 292 с.
2. Алабян А.М. Руслообразующие наносы и их транспорт в равнинной реке // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 1992. № 5. С. 22–28.
3. Архив наблюдений за морем в Мудьюге [Электронный ресурс] URL: https://tp5.ru/Архив_наблюдений_за_морем_в_Мудьюге (Дата обращения 01.04.2021).

4. Архив погоды на Мудьюг острове [Электронный ресурс] URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=22551> (Дата обращения 01.04.2021).
5. Брызгалов В.В., Скибинский Л.Э., Богунов А.Ю. Исследование устьевой области реки Северной Двины хронокартографическим методом. Архангельск: Лодия, 2008. 143 с.
6. Бухарицин П.И. Рецензия на монографию “Современное состояние и проблемы использования внутренних водных путей (на примере Волго-Каспийского морского судоходного канала)” // *Paradigmata roznani*. 2017. № 2. С. 66–72.
7. Виноградов А.К., Богатова Ю.И., Синегуб И.А. Подходные каналы и их значение в формировании экосистем акваторий морских портов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. № 26-1. С. 34–47.
8. Власов В.М. Морские каналы и средства навигационного оборудования морских путей. М.: Транспорт, 2001. 368 с.
9. Гидрология устьевой области Северной Двины. / Под ред. Зотина М.И., Михайлова В.Н. М.: Гидрометеоздат, 1965. 376 с.
10. Губина Н.А. Защита подходных каналов морских портов от заносимости. Автореф. дис. канд. геогр. наук. Московский государственный строительный университет, Москва, 2007. 23 с.
11. Доронин Ю.В. Океанография шельфовой зоны. СПб.: РГГМУ, 2007. 128 с.
12. Иглин С.М., Коробов В.Б. Пространственно-временные особенности заносимости канала Мудьюгских башен в морском порту Архангельск // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 48–58.
13. Иглин С.М., Лещев А.В., Коробов В.Б. Оценка масштабов заносимости судоходного канала в морском порту Архангельск. // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13. № 1. С. 46–54.
14. Илюшин В.Я. Статистическая оценка бюджета наносов участка Керченской бухты и заносимости подходного канала Керченского Морского Торгового Порто (КМТП) // Украинский гидрометеорологический журнал. 2008. № 3. С. 213–220.
15. Кнапс Р.Я. О расчете мощности вдольбереговых потоков песчаных наносов в море // Океанология. 1968. Т. 8. Вып. 5. С. 848–857.
16. Кравчишина М.Д., Шевченко В.П., Филиппов А.С. и др. Вещественный состав водной взвеси устья реки Северной Двины (Белое море) в период весеннего половодья // Океанология. 2010. Т. 50. № 3. С. 396–416.
17. Лебедева С.В., Алабян А.М., Крыленко И.Н., Федорова Т.А. Наводнения в устье Северной Двины и их моделирование // Геориск. 2015. № 1. С. 18–25.
18. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
19. Лещев А.В. Влияние судоходного канала порта Архангельск на перенос взвешенных веществ в зоне смещения “река–море” устья реки Северной Двины // Проблемы региональной экологии. 2018. № 2. С. 17–21.
20. Лещев А.В., Мискевич И.В., Коробов В.Б. и др. Пространственные особенности приливной изменчивости гидролого-гидрохимических характеристик устьевой области реки Северная Двина // Океанология. 2017. Т. 57. № 2. С. 303–310.
21. Лещев А.В., Хоменко Г.Д., Коробов В.Б. и др. Экспедиционные работы в устьевой области реки Северной Двины в марте 2014 г. // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 315–317.
22. Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И. и др. Взвесь и гидрооптика Белого моря – новые закономерности количественного распределения и гранулометрии // Актуальные проблемы океанологии / Гл. ред. Н.П. Лавров. М.: Наука, 2003. С. 556–607.
23. Лоция Белого моря. СПб.: ГУНиО МО РФ, 1995. 335 с.
24. Мискевич И.В. Гидрохимия приливных устьев рек: методы расчетов и прогнозирования. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург. 2005. 52 с.
25. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1976. 413 с.
26. НД 2-029901-009 Справочные данные по режиму ветра и волнения Берингова и Белого морей. Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2010. 66 с.
27. Наставления по службе прогнозов, раздел 3, часть 1. Прогнозы режима вод суши. Л.: Гидрометеоздат. 1962. 193 с.
28. Нуднер И.С., Максимов В.В., Майоров Ю.Б., Бабчик Д.В. Моделирование динамики наносов в прибрежной зоне // ЖВТ. 2008. №2. С. 60–77.
29. Погода в России и мире, прогноз погоды от Метеоцентра [Электронный ресурс] URL: <http://meteo-center.net/> (Дата обращения 01.04.2021).
30. Понятовский В.В. Техническая эксплуатация основных элементов порта. М.: Рконсульт, 2004. 332 с.
31. Руководство по методам исследований и расчетов перемещения наносов и динамики берегов при инженерных изысканиях / Под ред. М.Н. Костяницына, Л.А. Логачева, В.П. Зенковича. М.: Гидрометеоздат, 1975. 240 с.
32. СП 444.1326000.2019 Нормы проектирования морских каналов, фарватеров и зон маневрирования. М.: Стандартинформ, 2020. 108 с.
33. Чечко В.А., Чубаренко Б.В., Болдырев В.Л. и др. О динамике береговой зоны моря в районе огражденных молов Калининградского морского канала // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 6. С. 681–691.
34. Чечко В.А., Чубаренко Б.В., Курченко В.Ю. О натуральных исследованиях взвешенного вещества, образующегося в судоходном канале под воздействием движущихся судов // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 3. С. 297–305.
35. Шевченко В.П., Покровский О.С., Филиппов А.С. и др. Об элементном составе взвеси реки Северная Двина (бассейн Белого моря). // Докл. РАН. 2010. Т. 430. № 5. С. 686–692.

36. Эспития Э.С.Ф., Качалова А.Е., Гайдукова Е.В., Викторова Н.В. Краткосрочные прогнозы расходов воды рек Колумбии по математическим моделям // МНИЖ. 2017. № 5-2 (59).
37. Яковлев А.Е., Мискевич И.В. Оценка влияния приливов на содержание взвесей в устьях рек западного сектора Российской Арктики // Вестник современных исследований. 2018. № 8.1(23). С. 93–98.
38. Alabyan A.M., Lebedeva S.V. Flow dynamics in large tidal delta of the Northern Dvina River: 2D simulation // J. Hydroinformatics. 2018. 20 (4), P. 798–814. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.051>
39. Delft3D [Электронный ресурс] URL: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/home> (Дата обращения 01.04.2021).
40. Dyer K.R. Coastal and estuarine sediment dynamics. Chichester UK: Wiley, 1986. 358 p.
41. Grabemann I., Krause G. Transport processes of suspended matter derived from time series in a tidal estuary // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1989. V. 94. № C10. P. 14373–14379. <https://doi.org/10.1029/JC094iC10p14373>
42. Liu X., Huang W. Modeling sediment resuspension and transport induced by storm wind in Apalachicola Bay, USA. // Environmental Modelling & Software. 2009. V. 24. Is. 11. P. 1302–1313.
43. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 –discussion of principles // J. Hydrology. 1970. V. 10. P. 282–290.

Specific Features of the Sedimentation of the Mudyug Towers Channel in the Arkhangelsk Sea Port in the Mouth of the Northern Dvina

S. M. Iglina^{a, #}, A. M. Alabyan^b, V. B. Korobov^{c, ##}

^aFSUE “Rosmorport”, Moscow, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^cShirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia

[#]e-mail: iglin.sm@bk.ru

^{##}e-mail: szoioran@mail.ru

The shipping channels of the seaport of Arkhangelsk, located in the mouth area of the Northern Dvina River, have a significant impact on the natural processes occurring in its water area. The largest of these are the shipping channels, which are regularly dredged. In turn, the water area of the channels is exposed to sedimentation. The water area of the Mudyug towers channel is exposed to the greatest volumes of sediments during the storms, which is considered in this work. For evaluation of storm sediments, statistical dependences of the volumes of transported sediments with the energy characteristics of storms were obtained on the basis of factual material. It was found that the relationship between the volumes of storm sediments and the energy dependences of the storm (average speed, duration, wind direction) is linear, with the average value of the correlation coefficient for the entire channel being 0.94. The efficiency of forecasting the volumes of storm sediments is confirmed by the values of the NSE criteria (0.89) and the efficiency of forecasting S/σ (0.31) on average for the entire channel. The volumes of sediments, calculated according to the proposed methodology, exceed the actual ones by 19% on average, which is acceptable for planning dredging and making management decisions.

Keywords: storm sediments, navigable channel, Northern Dvina, dredging