

УДК [556.166:627.51+556.167.6+551.465.75]:556.54(282.247.13)

Д.В. Магрицкий¹, Е.Н. Скрипник²

ОПАСНЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В УСТЬЕ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ И ФАКТОРЫ ИХ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

Рассмотрены результаты детального изучения опасных гидрологических процессов на устьевом участке р. Северная Двина. Основное внимание уделено образованию заторов льда, стоковым и заторным наводнениям, штормовым нагонам и вызываемым ими наводнениям, неблагоприятным ветровым сгонам и стоковым обмелениям. Приведены уточненные и новые сведения о локализации, повторяемости и интенсивности этих процессов и многолетней изменчивости их характеристик. Временные изменения опасных и неблагоприятных гидрологических процессов в устье Северной Двины за период 1900–2013 гг. проанализированы с учетом особенностей и закономерностей многолетних вариаций стока реки, ее гидрологического режима, режима моря, климатических условий. Получены новые оценки характеристик стока и гидрологического режима устья реки, обоснованы выводы о их пространственно-временной изменчивости и ее причинах. Приведены подробные сведения об ущербе от наводнений, структуре и эффективности мероприятий по предупреждению и защите от заторообразования и наводнений в устье Северной Двины, а также новые данные о строении и параметрах устья Северной Двины.

Ключевые слова: река, море, устьевой участок, дельта, гидрологический режим, сток и уровень воды, наводнения, маловодье, заторы льда, нагоны и сгоны, ущерб, защитные мероприятия.

Введение. Среди основных арктических устьев России самое освоенное и урбанизированное – устье р. Северная Двина, это крупный промышленный и транспортный узел. Человек здесь постоянно сталкивается с опасными гидрологическими явлениями (ОГЯ) и процессами. Но, несмотря на длительную историю мониторинга и изучения ОГЯ, принимаемые меры борьбы и реализуемые защитные мероприятия, ОГЯ периодически происходят и наносят ущерб населению и экономике. Безусловно, значимые успехи в мониторинге, исследовании, прогнозе и предотвращении ОГЯ есть, но сведений об этой деятельности и ее результатах не очень много, как и по составу, пространственной локализации, закономерностям возникновения и развития, характеристикам и изменчивости ОГЯ, особенно после 1980-х гг., хотя такие данные имеют как научную, так прикладную ценность.

Единственная комплексная работа, посвященная устью Северной Двины, – монография «Гидрология устьевой области Северной Двины» [1965]. В ней на высоком профессиональном и научно-методическом уровне рассмотрен весь спектр основных гидрологических процессов, включая опасные, приведены уникальные и самые современные на тот момент сведения об объекте и его элементах, гидрологические данные, результаты их обработки и др. Другие работы касаются лишь отдельных вопросов: заторов льда и стоково-заторных наводнений [Агафонова, Фролова, 2006; Алексеевский и др., 2015; Бусин и др., 2011; Грищенко, Водовозова, 2011; Зайков, 1954; Каталог..., 1976; Фролова и др., 2007; Magritsky et al., 2013a], штормовых нагонов и сго-

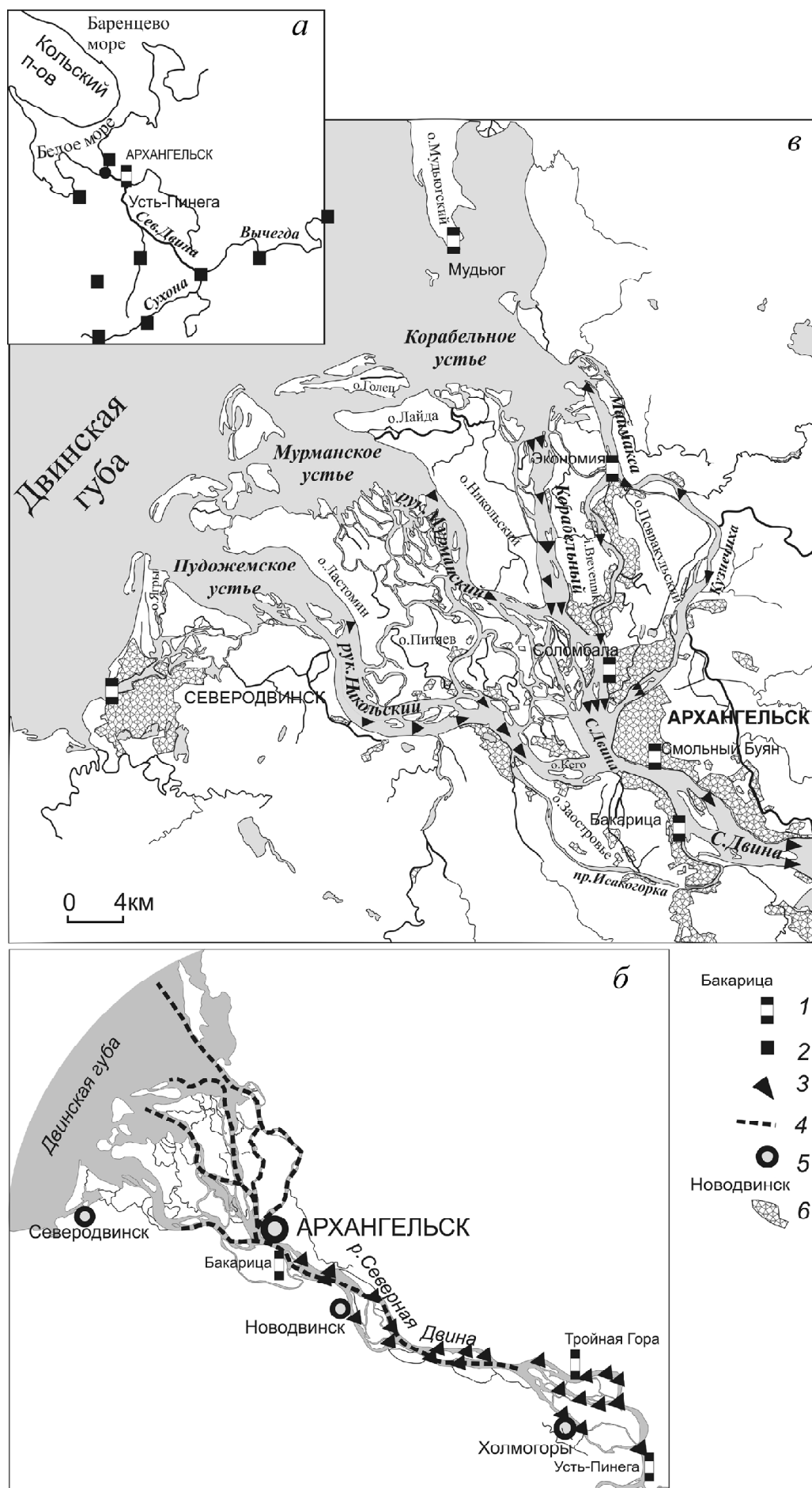
нов [Гидрометеорология..., 1991; Magritsky et al., 2013a], их мониторинга, моделирования и предотвращения [Васильев, 2006; Лебедева, 2016; Лупачев и др., 2010; Magritsky et al., 2013a; Skripnik, 2013], проникновения морских вод в устье [Лупачев, 1976; Лупачев, Макарова, 1984], а также русловых процессов [Брызгалов и др., 2008; Русловые..., 2012; Magritsky et al., 2013b].

Мы, безусловно, учитывали результаты предыдущих исследований, но существенно дополнили, уточнили и систематизировали их. Приводимые в статье итоги многолетних исследований отражают не только современную ситуацию с ОГЯ в устье Северной Двины, но и ее развитие в течение XX–начале XXI в., факторы и закономерности этого процесса, его связь с речным стоком, морскими факторами, климатическими изменениями и реализацией мер по борьбе с ОГЯ.

Материалы и методы исследований. Устьевой участок Северной Двины включает придельтовую часть и дельту [Гидрология..., 1965; Михайлов, 1997]. Придельтовый участок начинается от устья р. Пинега, имеет широкую пойму и сложноразветвленное русло; его длина ~90 км (рис. 1, а). Основное русловое разветвление расположено у с. Холмогоры. Ниже по течению находится еще 3 крупных разветвления. Длина дельты 45 км, площадь ~900 км². Среднее превышение дельтовой суши над уровнем моря варьирует от 0,5 до 4 м. Дельта многорукавная – число крупных водотоков около 36 (всего их 150). Основные рукава – Никольский (длина 40 км; ширина от 1,2–2,5 до 3,5–4,5 км), Мурманский (30 км; от 1–2 до 5–7 км), Корабельный (35 км;

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, доцент; e-mail: magdima@yandex.ru

² ГУ «Архангельский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями», начальник отдела речных и морских гидрологических прогнозов; e-mail: gidro@arh.ru



1–1,5 км), Маймакса (судоходный, ширина 0,2–0,6 км) и Кузнечиха (25 км; ширина 0,3–0,5 км) (рис. 1, б). Крупные острова – Кего, Ласомин, Никольский, Лайда, Ягры, Повракульский, Бревенник, Питяев, Голец и др. Острова занимают около 55% общей площади дельты [Эстуарно-дельтовые..., 2007]. Лето в устье прохладное, зима не очень холодная, климат избыточно влажный. Холодный период в среднем составляет 180 сут. В холодный период доминируют ветры южных румбов, в теплый период – северных. Растительная подзона северо-таежная; многолетняя мерзлота отсутствует; много болот. К XXI в. человек значительно изменил ландшафтный облик придельтового участка и особенно дельты. Значительную часть последней занимают города Архангельск и Северодвинск, дороги и сельскохозяйственные угодья; на придельтовом участке – г. Новодвинск и большое число сельских поселений; высотные отметки поверхности дельты (в пределах Архангельска) искусственно увеличены. В дельте и окрестностях в настоящее время проживают около 550 тыс. человек.

Рассмотрение таких ОГЯ, как стоковые, стоково-заторные и нагонные наводнения, опасные обмеления в реке, дельтовых рукавах и на устьевом взморье, заторы льда и зажоры, оценка характеристик стока и гидрологического режима устьевых участков р. Северная Двина, анализ характера и причин их многолетней изменчивости выполнены с привлечением обширного массива разнообразных данных. Основу его составили материалы режимных наблюдений за уровнями (H) и расходами воды (Q), за ледовыми явлениями на 14 речных гидрологических постах, а за уровнями моря – на 2 постах. Среди этого числа постов единственный стоковый пост – с. Усть-Пинега (рис. 1). Он находится в 137 км от моря, на верхней границе устьевых участков, функционирует с 1877 г. Другие важные посты: Тройная Гора (107-й км; период действия 1959–2013 гг.) и Бакарица (47 км; 1956–2003) на придельтовом участке; Смольный Буян (42 км; с 1958 г.), Соломбала (35 км; главный пост в дельте, с 1881 г.), Конвейер (19 км; 1955–2002), Экономика (16 км; 1955–1986) и Рикасиha (25 км; 1955–1986) в дельте; Мудьюг (с 1914 г.) и Северодвинск (с 1936 г.) на морском побережье.

Кроме того, привлечены данные наблюдений за количеством осадков и температурой воздуха на следующих метеостанциях устьевых участков и всего бассейна Сев. Двины: Архангельск (64°30' с.ш., 40°43' в.д.), Шенкурск (62°06', 42°54'), Няндома (61°40', 40°11'), Троицко-Печорское (62°42', 56°12'), Сыктывкар (61°40', 50°52'), Вологда, Прилуки (59°19', 39°55'), Тотьма (59°53', 42°45') и Котлас (61°16', 46°43'). Источник метео данных – ВНИИГМИ Ми-

ровой центр данных в Обнинске [URL: <http://meteo.ru/data>, 2016]. В месячные суммы осадков внесены соответствующие поправки на смачивание и замену в 1950-х гг. дождемеров на осадкомеры конструкции Третьякова.

Критические отметки для некоторых ОГЯ и постов, материалы экспедиционных измерений, важные результаты предыдущих исследований, архивные сведения о происходивших в прошлом ОГЯ, в том числе из архивов региональных подразделений Росгидромета и Министерства чрезвычайных ситуаций РФ, кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова [URL: <http://www.nral.org/>, 2016], сформировали еще один массив исходных данных.

Основными методами обработки и анализа исходных данных стали стандартные гидрологические расчеты, статистические методы анализа с проверкой рядов на соответствие важным статистическим гипотезам (при уровне значимости $\alpha=5\%$) с помощью критериев Фишера (F -test), Стьюдента (t -test) и Манна-Уитни (U -test) применительно к коррелированной во времени и асимметричной гидрологической информации, критериев Андерсена ($t(A)$) и числа серий ($t(u)$), коэффициента ранговой корреляции Спирмена ($Spearman\ RCC$). Построены разнообразные эмпирические зависимости и хронологические графики, выполнена оценка тесноты связи и адекватности (на базе $adjusted\ R^2$ и F), а также аналитическая аппроксимация. Ординаты разностной интегральной кривой (St) рассчитаны по

формуле $St_i = \sum_1^i \left(\frac{x_i}{\bar{x}} - 1 \right)$, а суммарной интегральной кривой – по $Ss_i = \sum_1^i \frac{x_i}{\bar{x}}$. Часть статистического анализа проведена в программах Гидрорасчеты (НПО «Гидротехнология»), Excel (компания Microsoft) и Statistica (StatSoft).

Результаты исследований и их обсуждение.
Гидрологические факторы опасных гидрологических процессов и их многолетние изменения. Состав, интенсивность и локализация опасных гидрологических процессов зависят не только от строения устьевых участков (см. выше), но и от гидрометеорологических факторов, их взаимодействия между собой, пространственно-временной изменчивости, в том числе под влиянием хозяйственной деятельности. В перечне этих факторов особое место занимают речные: сток воды и водный режим реки, наносы, температурный и ледовый режим и др. Они, точнее их характеристики, обладают тремя видами основной изменчивости: вдоль устьевых участков, в течение года и в многолетнем масштабе, что влечет за собой смену в характере опасных

Рис. 1 Схематические карты бассейна (а), устьевых участков (б) и дельты (в) Северной Двины: 1 – гидрологические посты, 2 – метеостанции, 3 – места образования заторов льда, 4 – участки проведения ледокольных работ, 5 – населенные пункты, 6 – городские территории

Fig. 1. Schematic maps of the Northern Dvina River basin (a), river mouth area (b) and the delta (c): 1 – hydrological stations, 2 – meteorological stations, 3 – sites of ice-jam formation, 4 – river reaches with ice-breaking operations, 5 – settlements, 6 – urban territories

процессов. Если первые два вида в условной степени детерминированы, то третий содержит в себе неизвестные случайную и трендово-циклическую составляющие.

Сток р. Сев. Двина (W_r) на замыкающем створе у с. Усть-Пинега, согласно нашим оценкам, составляет 104 км³/год (1882–2013). К морю W_r увеличивается до ~107 км³/год благодаря боковой приточности (+2,65 км³) и положительной разности между количеством осадков и испарением в речной дельте (+0,35 км³). Сам сток распределяется (%) в дельте между рукавами Никольский (32,2), Мурманский (18,2), Корабельный (21,5), Маймакса (18,4), Кузнечиха (5,4) и Рыболовка (4,3) [Полонский,

78 сут. Половодье сменяется летне-осенней меженью, лимитирующей судоходство и водоснабжение. Межень часто прерывается дождевыми паводками (как правило, осенью и уже распластанными). Максимальные расходы воды паводков меньше $Q_{\text{макс}}$ половодья в 4,5 раза, поэтому даже на фоне осеннего заторо- и зажорообразования они не приводят к наводнениям. В начале ноября, с установлением ледостава на реке, летне-осенняя межень переходит в зимнюю с минимальными за год расходами воды. Даты начала и окончания ледовых явлений приведены в таблице. Вдоль устьевых участка они изменяются, как, впрочем, и остальные гидрологические характеристики.

**Характеристики стока воды и ледово-термического режима на устьевом участке
р. Северная Двина в разные периоды**

Характеристика	Период		
	1881–1935	1936–1975	1976–2013
Среднеголетний $Q_{\text{ср}}$, м ³ /с	3520 (0,19;2,5;0,31) ¹	3085 (0,19;1,0;1,16) ¹	3265 (0,14;0,0;0,06) ¹
Среднеголетний $Q_{\text{макс}}$, м ³ /с	22100 (0,2;0;0) ¹	21100 (0,28;2,5;-0,3) ¹	21000 (0,2;0;-0,06) ¹
Среднеголетний $Q_{\text{мин.ЛО}}$, м ³ /с	1600 (0,36;0;0,16) ¹	1220 (0,23; -;0,2) ¹	1500 (0,23;2,5;0,10) ¹
$Q_{\text{ср сез}}$ м ³ /с за апрель–июль	6750 (64%) ²	6290 (68%) ²	6500 (66%) ²
за август–октябрь	2800 (20%) ²	2100 (17%) ²	2180 (17%) ²
за ноябрь–март	1370 (16%) ²	1100 (15%) ²	1320 (17%) ²
Средняя температура воды, °С: апрель–май / июль–июль / август– сентябрь / октябрь–ноябрь	–	2,0 / 15,7 / 13,5 / 1,5	2,6 / 17 / 13,7 / 1,9
Тепловой сток, кДж, $n \cdot 10^{12}$	–	2680	2970
Первое появление льда (дата)	31.10./3.11. ^{3,4}	03.11./02.11. ³	29.10./05.11. ³
Начало ледостава (дата)	10.11./14.11. ^{3,4}	14.11./20.11. ³	18.11./22.11. ³
Весеннее вскрытие (дата)	03.05./04.05. ^{3,4}	04.05./06.05. ^{3,4}	30.04./01.05. ³
Очищение от льда (дата)	10.05./10.05. ^{3,4}	11.05./10.05. ^{3,4}	08.05./07.05. ³
Продолжительность ледостава, сут.	173/172 ^{3,4}	170/167 ³	161/156 ³
Продолжительность ледовых, сут.	192/188 ^{3,4}	189/189 ^{3,4}	192/184 ³
Максимальная толщина льда, см	–	59/67 ³	62/63 ³
Число стоковых и стоково-заторных опасных затоплений и наводнений	30 ⁴	22	19
Число нагонных опасных затоплений и наводнений	12 ⁴	30	41

Примечания. ¹В скобках – значения коэффициента вариации C_v , отношения C_s/C_v и коэффициента автокорреляции r (лаг 1); ²в скобках – доля сезонного стока в годовом объеме; ³слева от черты – для поста Усть-Пинега, справа от черты – для поста Соломбала (Архангельск); ⁴за неполный период; прочерк – данные отсутствуют.

Кузьмина, 1986]. В зимний период доля Мурманского и Корабельного рукавов обычно возрастает, а рукава Маймакса – уменьшается. Сток наносов оценен нами в 3 млн т/год (при средней мутности воды 30 г/м³); к морю он увеличивается на ~60 тыс т. В течение года основная часть стока (60%), как и максимальные за год расходы воды ($Q_{\text{макс}}$), вызывающие наводнения, проходят в половодье. Оно обычно начинается во второй половине апреля, завершается в первой половине июля и длится в среднем

Многолетние колебания стока Сев. Двины отличает, во-первых, смена периодов разной водности и продолжительности и их цикличность в целом (рис. 2). Последняя имеет относительно строгий вид лишь у $Q_{\text{макс}}$; у Q_r и $Q_{\text{мин.ЛО}}$ разностные интегральные кривые похожи. Во-вторых, это убывающий тренд (за исключением Q зимы и весны), статистически значимый для летне-осеннего сезона. Главная же особенность временного ряда Q – его деление на три относительно однородных

подмножества, в меньшей мере затронувшее $Q_{\text{макс}}$, в большей – минимальный сток и многие среднемесячные Q . Границами между подпериодами служат середина – вторая половина 1930-х гг. и 1970-е гг.

Первый перелом в характере многолетних колебаний Q , обнаруженный нами и для других рек региона, приходится на период так называемого потепления Арктики, начавшегося в 1920-х гг. и достигшего кульминации в 1930-х гг., и одновременного снижения количества осадков [Грищенко, Водовозова, 2011]. Переход от второго сравнительно холодного и маловодного подпериода стал реакцией на усилившееся глобальное и региональные потепления [Второй..., 2014]. В бассейне Сев. Двины оно было неустойчивым и нечетким вплоть до 1987 г. А с самого начала 2000-х гг. его величина возросла еще больше и продолжает расти. В итоге среднее по бассейну отклонение температуры приземного воздуха (далее ТПВ) в 1976–2015 гг. от ее величины в 1936–1975 гг. составило $\sim 0,50\text{--}0,65\text{ }^{\circ}\text{C}$, а коэффициент линейного тренда – $\sim 0,5\text{--}0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Потепление обусловлено положительными тенденциями, главным образом зимой ($0,4\text{--}1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), весной ($1,2\text{--}1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и осенью ($0,2\text{--}0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Увеличение годовой суммы осадков ($P_{\text{г}}$) во второй половине 1970-х гг. было невыраженным и неустойчивым, охватило не всю территорию бассейна. В юго-восточной, юго-западной и в остальных частях бассейна Сев. Двины значимый рост $P_{\text{г}}$ зарегистрирован с 1982 г., с конца 1980-х гг. и с конца 1980-х–начала 1990-х гг. соответственно. Последнее повышение $P_{\text{г}}$ датируется серединой 2000-х гг. Правда, в бассейне р. Сухона его предвещал (с конца 1990-х гг.) сравнительно засушливый период. В целом осредненная для территории бассейна Сев. Двины аномалия $P_{\text{г}}$ положительная ($+30\text{ мм}$), хотя в устье реки отклонение от 1936–1975 г. составило -2 мм ($-0,3\%$), в бассейне Сухоны – 13 мм ($+2,3\%$), в бассейне Вычегды – 52 мм ($+9,5\%$). Вклад весенних осадков в рост $P_{\text{г}}$ составил приблизительно -2% (в целом по бассейну), летних – $\sim 58\%$, осенних – $\sim 3\%$, зимних – $\sim 41\%$. Такой же неоднозначной выглядит ситуация

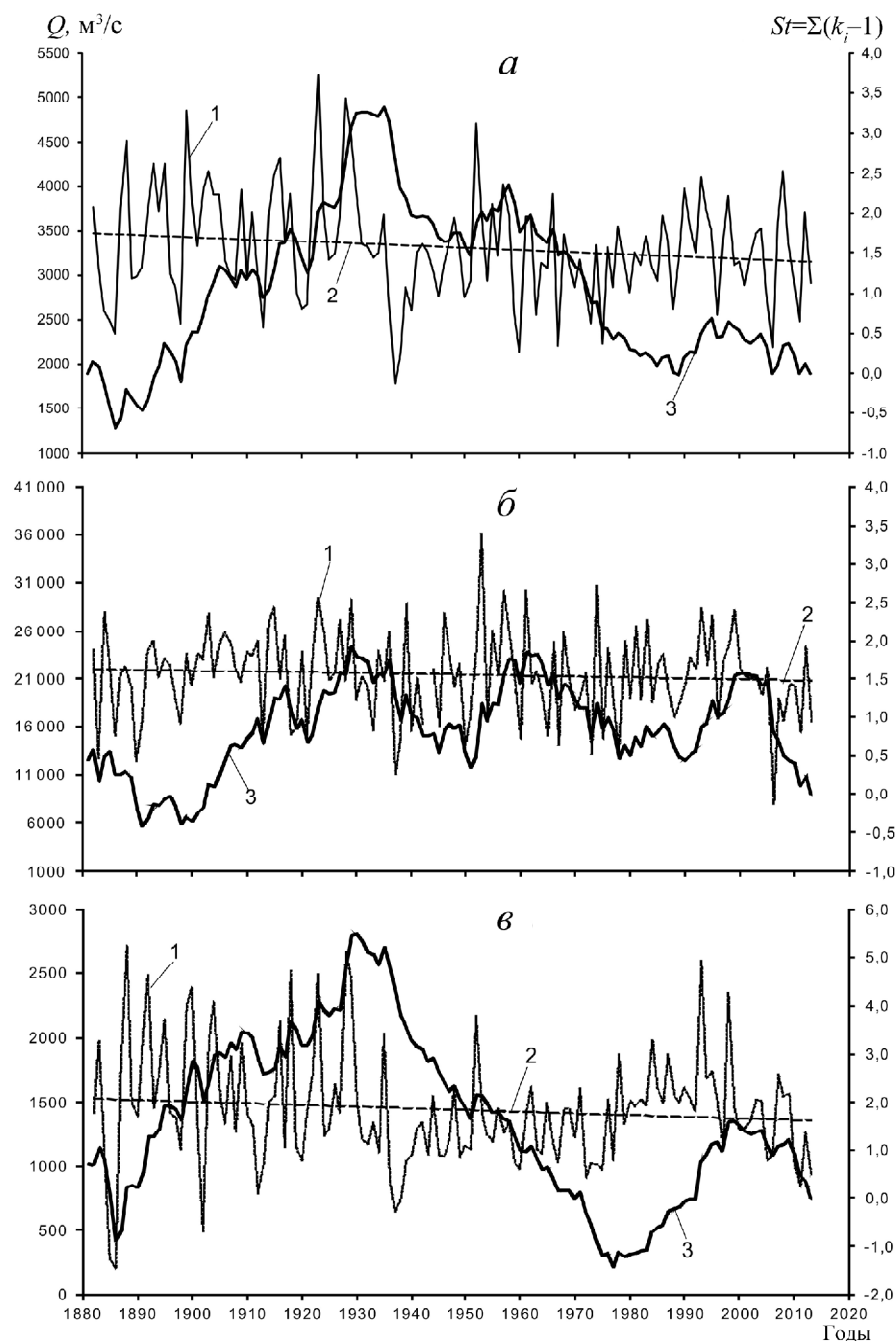


Рис. 2. Многолетние колебания среднегодовых (а), максимальных за год (б) и минимальных летне-осенней межени (в) расходов воды р. Северной Двины на посту Усть-Пинега: 1 – расходы воды, 2 – линейный тренд, 3 – разностная интегральная кривая (правая ось)

Fig. 2. Long-term oscillations of the annual average (a), annual maximum (б) and summer-autumn low-water period minimum (в) water discharges of the Northern Dvina River (at the Ust'-Pinega hydrological station): 1 – water discharges, 2 – linear trend, 3 – residual mass curve (right-hand axis)

с хронологией многолетних колебаний сезонных сумм осадков и ТПВ.

В результате стационарность многолетних рядов расходов воды оказалась нарушена: по среднему, дисперсии, автокорреляции и по характеру межгодовой и долгопериодной изменчивости в целом. В соответствии с СП 33-101-2003 это требует отдельного расчета параметров распределения Q и построения кривых обеспеченности (таблица), а также коррекции деятельности по борьбе с опасными гид-

рологических процессами. Первый подпериод был самым многоводным и проблемным в плане стоково-заторных наводнений (см. ниже), но ограничения по водопользованию в межень были минимальны. Второй подпериод был, наоборот, маловодным, особенно для минимального стока, для Q зимних месяцев, марта и апреля. В третий – опять многоводный – подпериод увеличение значений не обнаружено лишь для $Q_{\text{макс}}$ (несмотря на то что объемы стока половодья возросли), $Q_{\text{ср.VI}}$ и $Q_{\text{ср.X}}$. Особенно увеличились $Q_{\text{мин}}$ летне-осенней межени, расходы воды августа–сентября ($Q_{\text{ср.VIII}}$, $Q_{\text{ср.IX}}$), ноября–января ($Q_{\text{ср.XI}}$, $Q_{\text{ср.XII}}$, $Q_{\text{ср.I}}$), марта ($Q_{\text{ср.III}}$). Тем не менее это мало повлияло на современную ситуацию со стоковыми обмелениями в навигационный период, тем более что для Q в июне–сентябре и в целом в летне-осенний сезон выявлен убывающий тренд ($SRCC = -0,10 \dots -0,17(-)$). В случае сохранения этой тенденции меженный сток может вернуться к показателям предыдущего подпериода, а в последующем – к более неблагоприятным значениям. Среди изменения других гидрологических характеристик важно отметить существенное повышение температуры воды в 1976–2013 гг., более позднее осеннее ледообразование и раннее вскрытие реки, общее сокращение продолжительности периода с ледовыми явлениями, уменьшение толщины речного льда (таблица). С учетом климатических прогнозов [Второй..., 2014] закономерно ожидать не только продолжения этих тенденций в будущем, но и их усиления.

Водохозяйственная деятельность практически не влияет на величину и режим стока Сев. Двины. Водопотребление достигало здесь максимальной величины в 1980-х гг.: суммарный забор воды – 1,15 км³/год (или около 1% от W_r на морском крае дельты), отведение сточных вод – 1,07 км³/год [Государственный..., 1982–2014]. В настоящее время забирается примерно столько же воды (0,63 км³/год за 2009–2013 гг.), сколько сбрасывается (0,60 км³/год). Крупных водохранилищ, тем более на главной реке, в бассейне Сев. Двины нет. Особенности воздействия водохозяйственных мероприятий на уровень, термический и ледовый режим устьевое участка реки рассмотрены ниже.

В дельте, по направлению к морю, усиливается роль морских гидрологических факторов. На распределение стока между рукавами, колебание уровня воды и затопление дельтовой суши, опасные обмеления, скорость течения и др. влияют прежде всего приливы и сгоны–нагоны. Приливы на устьевом взморье Сев. Двины мелководные, полусуточные [Гидрология..., 1965; Гидрометеорология..., 1991; Михайлов, 1997; Национальный..., 2007]. Максимальная величина приливов на посту Мудьюг достигает 1,3 м, величина квадратурного прилива – 0,8 м. Наибольшие величины нагонов (как отклонение от среднемесячного уровня) составили в ноябре 2011 г. 1,9 м у Мудьюга и 2,05 м у Соломбалы, величина ветрового сгона – 0,9 м (Мудьюг). Инду-

цированные приливами и нагонами колебания уровня проникают на придельтовый участок вплоть до устья р. Пинега (и даже дальше), быстро затухая при больших расходах воды и ледяном покрове. Во время половодья приливы редко распространяются более чем на 50 км. При среднем стоке реки средняя величина приливов составляет: у морского края дельты 94 см, в Соломбале 74 см, Бакарице 69 см, в Коскове 50 см [Гидрология..., 1965].

Влияние приливов и нагонов, ветрового волнения усиливается по мере повышения уровня Белого моря (+0,31 см/год за 1993–2011 гг. [Второй оценочный..., 2014]) и «смягчения» ледовых условий (1982–2011 гг.: $\Delta F_{\text{лед}} = -209 \text{ км}^2/\text{год}$, $\Delta T_{\text{лед}} = -2,2 \text{ сут./год}$), а сгонов, наоборот, уменьшается. Специфический устьевой и одновременно опасный процесс представляет интрузия морских вод в дельтовые рукава. Она вызывает ухудшение качества воды и повышение ее агрессивных свойств, нарушение водоснабжения предприятий и населения, ухудшение условий обитания пресноводной биоты и другие негативные эффекты.

Заторы льда и стоково-заторные наводнения. Заторы льда формируют в устье Сев. Двины самые опасные и повторяющиеся наводнения. Они усиливают подъем уровня в русле и в итоге способствуют выходу речных вод на пойму, затоплению расположенных на ней объектов. Интенсивный ледоход в реке, навалы льда на берегах, давление ледяных масс на сооружения создают дополнительный ущерб.

Стоково-заторные наводнения сопровождают весеннее половодье и ледоход. Это неслучайно, поскольку в стадию подъема половодья уровень на замерзающих реках слагают две составляющие – стоковая $\Delta H_{\text{ст}}$, благодаря увеличению Q в реке, и подпорная $\Delta H_{\text{п}}$, значительная в случае образования затора льда ниже по течению. Если $\Delta H_{\text{п}} > 0$, уровни достигают наибольших величин, поэтому 75% всех максимальных за год уровней ($H_{\text{макс}}$) и самые высокие уровни в устье Сев. Двины (с. Усть-Пинега, 1900–2013 гг.) наблюдались в годы с заторами льда. Средняя и максимальная величины подъема уровня в половодье в устье Сев. Двины составляют 7 и 11 м соответственно, тогда как средняя $\Delta H_{\text{п}}$ равна 2,1 (Усть-Пинега) и 1,4 м (Соломбала), максимальная $\Delta H_{\text{п}} = 5,6$ м. Во время затора льда скорость подъема уровня может достигать 1–1,5 м/сут.

Места образования заторов в устье Сев. Двины региональным службам Росгидромета и МЧС известны (рис. 1), таких участков ~20. Мощные и продолжительные заторы образуются в Холмогорском разветвлении и выше по течению Усть-Пинеги (у с. Орлецы). В дельте заторообразование чаще развивается в верхней и средней частях рукавов. Гидрологические и метеорологические предпосылки появления заторов сравнительно хорошо изучены. Однако случаи возникновения заторов льда регистрируются на постах и вблизи них не всегда. Причины – частое образование заторов за пределами участка поста, ограниченность обзора при

наблюдениях с берега, нечеткость критериев при выделении этого события. Поэтому, несмотря на почти ежегодное образование заторов в низовьях Сев. Двины, а мощных заторов 6–8 раз в 10 лет [Васильев, 2006], их многолетняя повторяемость, согласно данным лишь стационарных наблюдений [Каталог..., 1976], не достигает 100%: лишь 60% у с. Орлецы и 58% у с. Усть-Пинега. Более точные сведения дает авиаразведка, проводившаяся с 1946 по 1990-е гг. В настоящее время ее заменил спутниковый мониторинг ледовой и общей гидрологической обстановки, правда, пока нерегулярный [Лупачев и др., 2010; Skripnik, 2013].

Заторы льда – фактор, поддающийся регулированию, что доказывает многолетний опыт борьбы с ними. Например, в устье Сев. Двины с ними борются с 1915 г. и особенно активно с 1960-х гг. Основные меры – радиационно-химическое, механическое, пиротехническое ослабление и разрушение ледяного покрова и самих заторов льда (рис. 1). Бомбометание, практиковавшееся с 1922 г., прекращено с 1970 г. из-за его дороговизны, малой эффективности и небезопасности, особенно в городской черте. Но как показывает недавнее (весной 2016 г.) разрушение силами ВКС РФ очень мощного затора в г. Великий Устюг, новые боеприпасы и средства их точного сброса выводят этот способ на совершенно иной безопасный и эффективный уровень.

Борьба с заторами, главным образом силами ледокольного флота, «обогрев» речных вод теплыми сточными водами, сбрасываемыми крупными предприятиями, общее климатическое потепление в регионе (см. выше) дали положительный эффект. Повторяемость заторов в Холмогорском разветвлении уменьшилась с 87% (1939–1961) до 59% (1962–2004), а на участке главного судового хода в дельте – с 30 до 1% [Васильев, 2006]. Средняя продолжительность их существования сократилась с 93 до 85 ч в Холмогорском разветвлении, в дельте – с 62 до 6 ч. Не стало обширных ледяных полей, которые причиняли большой вред береговым сооружениям и портовой инфраструктуре. Согласно нашим оценкам, $H_{\text{макс}}$ половодья снизились на 0,33 м в Усть-Пинега ($F\text{-test}(-)$, $t\text{-test}(-)$, $SRCC = -0,16(-)$) и на 0,6 м в Архангельске ($F\text{-test}(+)$, $t\text{-test}(+)$, $U\text{-test}(+)$, $SRCC = -0,43(+)$) (рис. 3, а, б). Дополнительным фактором падения $H_{\text{макс}}$ стало уменьшение $Q_{\text{макс}}$ (рис. 2, б).

На устьевом участке Сев. Двины в период с 1900 по 2015 г. идентифицировано около 71 стоково-заторных наводнений разной интенсивности (рис. 4, а). На долю умеренно опасных наводнений, или затоплений с незначительным ущербом пришлось 68% случаев. Чаще всего они происходили, когда $H_{\text{макс}}$ на посту Усть-Пинега находился в диапазоне от 850–900 до 1025 см, а $Q_{\text{макс}}$ – 19–29 тыс. м³/с. Опасные наводнения, т.е. уже с существенным ущербом, но без человеческих жертв, имели повторяемость 18% ($925 < H_{\text{макс}} < 1050$ см; $21\,000 < Q_{\text{макс}} < 31\,000$ м³/с), а особо опасные и катастрофические – 14% ($H_{\text{макс}} > 950$ см, $Q_{\text{макс}} > 25\,000$ м³/с). К последним отнесены наводнения в 1903, 1917, 1924, 1927, 1929,

1953, 1955, 1961, 1966 и 2003 гг. Но наиболее масштабные наводнения происходили в XVII–XIX вв. [Зайков, 1954]. Надежные сведения имеются о катастрофических наводнениях в 1621, 1750, 1761, 1763, 1779, 1784, 1796, 1805, 1808, 1811, 1843, 1853, 1858, 1881 гг., а также о 26 менее масштабных наводнениях с $H_{\text{макс}} < 500$ см (над нулем поста Соломбала), но выше 400 см. В целом в г. Архангельск затопления возможны при уровнях воды в реке и рукавах выше 280–300 см, в Холмогорах – при $H_{\text{макс}} > 840$ см.

Стоково-заторные наводнения обычно развиваются с конца апреля и в течение мая, иногда с переходом из одного месяца в следующий (в том числе иногда на июнь), длятся от нескольких дней до нескольких недель. Чаще всего они наблюдались в мае (79%). После 1966 г. повторяемость наводнений уменьшилась на 25%, в дельте особо опасных и катастрофических наводнений не было. Человеческих жертв нет уже давно; пространственные масштабы самих затоплений уменьшились. В настоящее время в пределах Архангельска чаще всего затопляются низинные части районов Бакарица, Динамо, Соломбала, Левый берег, островов Краснофлотский, Хабарка, Кего, а также ряд других территорий. Но достоверных сведений о материальном ущербе немного. Известно лишь, что в 1995–2004 гг. прямой ущерб от заторов льда на Сев. Двине и связанных с ними наводнений составил для Архангельской области и Архангельска около 6 млн долл. США, косвенный ущерб оценен в ~4,1–4,5 млн долл. [Васильев, 2006]. Причем лишь ущерб от особо опасного наводнения в с. Холмогоры весной 2003 г. составил ~2,4 млн долл. К косвенному ущербу относят в том числе затраты на борьбу с заторами, например в 2003 г. на ледокольные работы было израсходовано ~135 тыс. долл.

Из неблагоприятных ледовых явлений следует дополнительно назвать осенние заторы льда и зазоры, раннее ледообразование на судоходных участках и позднее ледообразования на участках организации зимних ледовых переправ. Но, хотя повторяемость осенних заторов льда и зазоров высокая (от 60 до 90% и больше), а максимальные величины $\Delta H_{\text{п}}$ достигают отметок 2,5–3 м, осенне-зимние $H_{\text{макс}}$ не превышали критических значений. Опасность этих явлений заключается в их прямом давлении и эрозионном воздействии на берега, конструкции и объекты на берегу и в русле, в предопределении образования заторов льда здесь весной и удорожании создания ледовых переправ (зимников).

Штормовые нагоны. Второй тип наводнений связан со штормовыми нагонами и развивается в основном в дельте. Опасные штормовые нагоны образуются при перемещении на восток глубоких циклонов, при сложении нагонного повышения уровня, индуцированного сильными и продолжительными северо-западными и северными ветрами, барической свободной волной, пришедшей из Баренцева моря, и прилива [Гидрология..., 1965; Гидрометеорология..., 1991]. В результате морские воды зали-

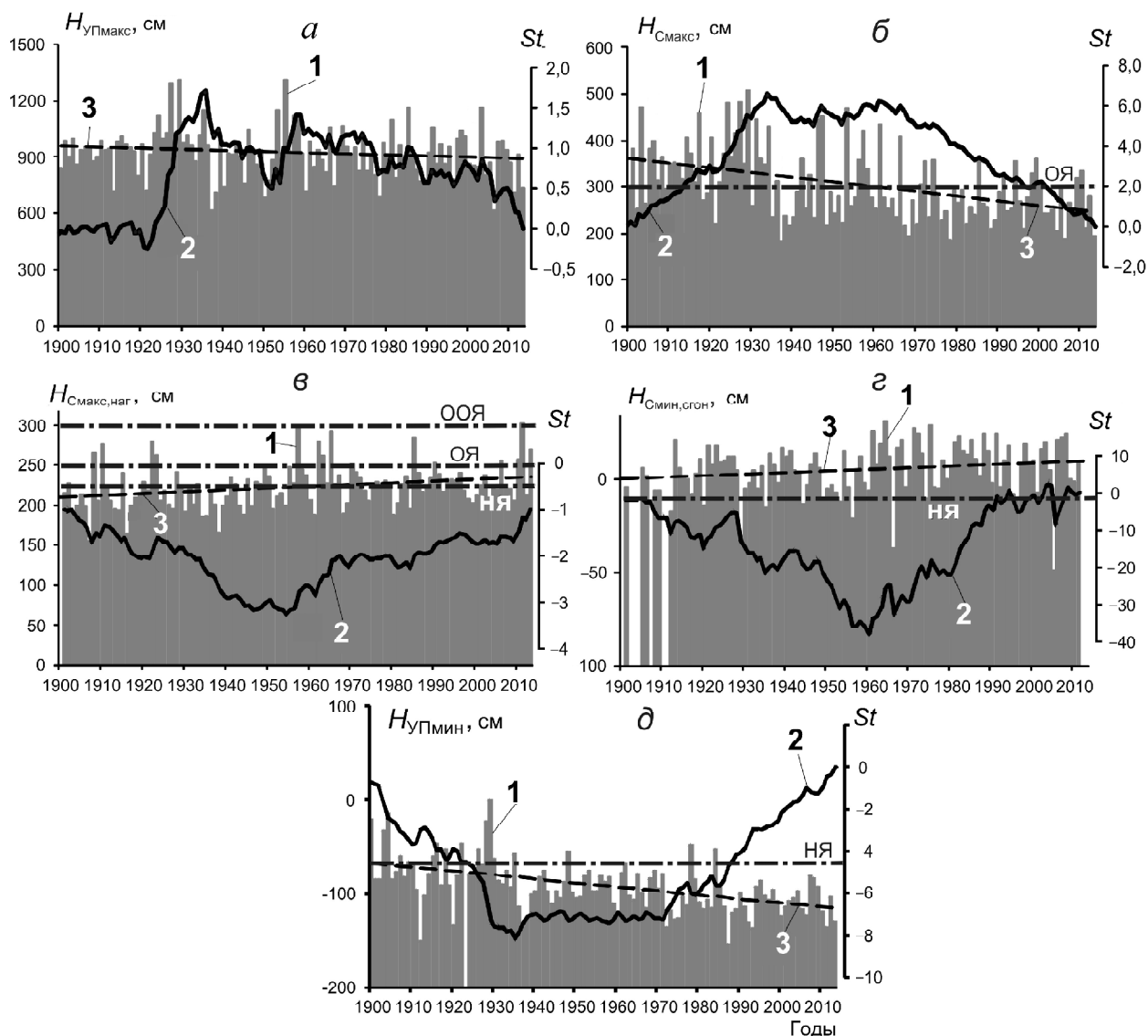


Рис. 3. Многолетние изменения максимальных стоково-заторных (а, б) и нагонных (в), минимальных стонных (г) и стоковых (д) уровней воды (1) реки Северной Двины на постах Усть-Пинега (а, д) и Соломбала (б, в, г) с разностной интегральной кривой (2; правая ось) и линейным трендом (3). Буквенные обозначения, согласно терминологии Росгидромета: НЯ – высотная отметка для неблагоприятного гидрологического явления, ОЯ – отметка опасного явления, ООЯ – отметка особо опасного (стихийного) явления

Fig. 3. Long-term variations of the Northern Dvina River water level (1: а, б – maximum river flow-ice-jam, в – maximum surge, г – minimum down surge and д – minimum river flow) at the Ust'-Pinega (а, д) and Solombala (б, в, г) hydrological stations; 2 – residual mass curve (right-hand axis); 3 – linear trend. The symbols (according to Roshydromet terminology): НЯ – elevation mark of an adverse hydrological phenomenon, ОЯ – mark of a dangerous phenomenon, ООЯ – mark of particularly dangerous (disaster) phenomenon

вают низменные приморские части островов дельты, а подпертые речные воды – низменные прибрежные участки вдоль дельтовых рукавов. Штормовой ветер и волнение, сильные течения, переформирование дна в судоходных каналах формируют дополнительные ущербы.

Продолжительность и масштабы нагонных наводнений обычно существенно меньше, чем у стоково-заторных наводнений. Средняя продолжительность стояния уровней воды выше отметки 200 см (T_{200}) на посту Соломбала составила 4,5 ч. (1976–2011), максимальная T_{200} – 84 ч (1983 г.). Зависимость между максимальными уровнями ($H_{C, \max}$) и T_{200} описывается выражением: $T_{200} = (0,226 \cdot H_{C, \max}) - 45,1$ (при $adj. R^2 = 0,8$). Сами же нагоны длятся в среднем 43,5 ч на посту Мудьюг и 46 ч на посту Солом-

бала. Максимальный уровень держится недолго, иногда лишь 10–20 мин.

В 78% случаев умеренно опасные ($H_{C, \max} > 220$ см) и опасные ($H_{C, \max} \geq 250$ см) нагонные повышения уровня воды наблюдались в устье осенью, 20% – в декабре–январе. Шесть из семи особо опасных ($H_{C, \max} \geq 275$ см) и катастрофических ($H_{C, \max} \geq 300$ см) нагонов происходили в октябре–ноябре. В течение года может быть несколько штормовых нагонов, причем иногда следующих один за другим.

За последние 115 лет в устье Сев. Двины отмечено около 83 штормовых нагона (80% из них умеренно опасные), приведших к тем или иным ущербам (рис. 4, б). Особо опасные и катастрофические нагоны были в 1910, 1922, 1957, 1962, 1965, 1985 и 2011 гг. Последний крупный нагон 14–16 ноября

2011 г. имел 1%-ную обеспеченность и нанес значительный ущерб. Нагон произошел за 3 дня до квадратуры и в период замерзания реки, порывы ветра достигали 30–38 м/с, высота волн на устьевом взморье – 2,5 м, сток реки был несколько выше нормы. Максимальный уровень на постах Мудьюг, Экономия и Соломбала составил 301, 325 и 302 см (над нулем поста Соломбала) соответственно. Затопления наблюдались в зоне шириной до 50 км (от морского края дельты), подпор распространился выше с. Усть-Пинеги. Продолжительность составила около 1,5 сут., максимальная глубина затопления – 1–1,5 м.

Поскольку максимальные нагонные уровни в устье Сев. Двины неуклонно повышаются со скоростью 2,2 см/10 лет на посту Соломбала (1901–2013 гг.; $F\text{-test}(-)$, $t\text{-test}(+)$, $SRCC=0,29(+)$) и 2,3 см/10 лет на посту Мудьюг ($F\text{-test}(-)$, $t\text{-test}(+)$, $SRCC=0,22(+)$) (рис. 3, в), частота и интенсивность нагонных затоплений будут лишь увеличиваться. Эта тенденция, согласно нашим исследованиям, – общая для морских устьев рек в европейской части России (исключение – лишь устья рек, впадающих в Каспийское море). Она объясняется как повышением среднего уровня моря, так и, возможно, усилением синоптической неустойчивости и другими причинами [Второй..., 2014; Magritsky et al., 2013b]. Поэтому значения скорости повышения максимальных нагонных уровней моря, фиксируемые на морских гидрологических постах, в 4–5 раз превысили за тот же период (1993–2011) скорость эвстатического повышения уровня Белого моря, полученную со спутников.

Меры защиты от нагонных наводнений в устье Сев. Двины такие же, как и в отношении стоковых и заторных наводнений: защитные вдольбереговые дамбы и каменные набережные, локальные дамбы вокруг важных объектов, искусственное повышение высотных отметок местности (в Архангельске оно уже составило 1,5 м и выше), возведение объектов на сваях, а также меры не инженерного характера – эффективные методики прогноза надвигающихся нагонов, отработанные схемы эвакуации населения из зон поражения. Строительство противонагонного барьера, как в устьях Невы, Темзы и Рейна, в Венеции, экономически нецелесообразно. Например, затраты на Комплекс защитных сооружений в Финском заливе составили 4–5 млрд долл. США [<http://foedus.ru/novosti>; <http://www.semiotic.ru/d/pub/>; <https://ru.wikipedia.org/wiki>, 2016], тогда как ущерб от катастрофического нагонного наводнения в 2011 г. в устье Сев. Двины оценен в ~1,5–2 млн долл. США.

Опасные обмеления. Их вызывают сильные стонные ветры южных румбов, малые расходы воды

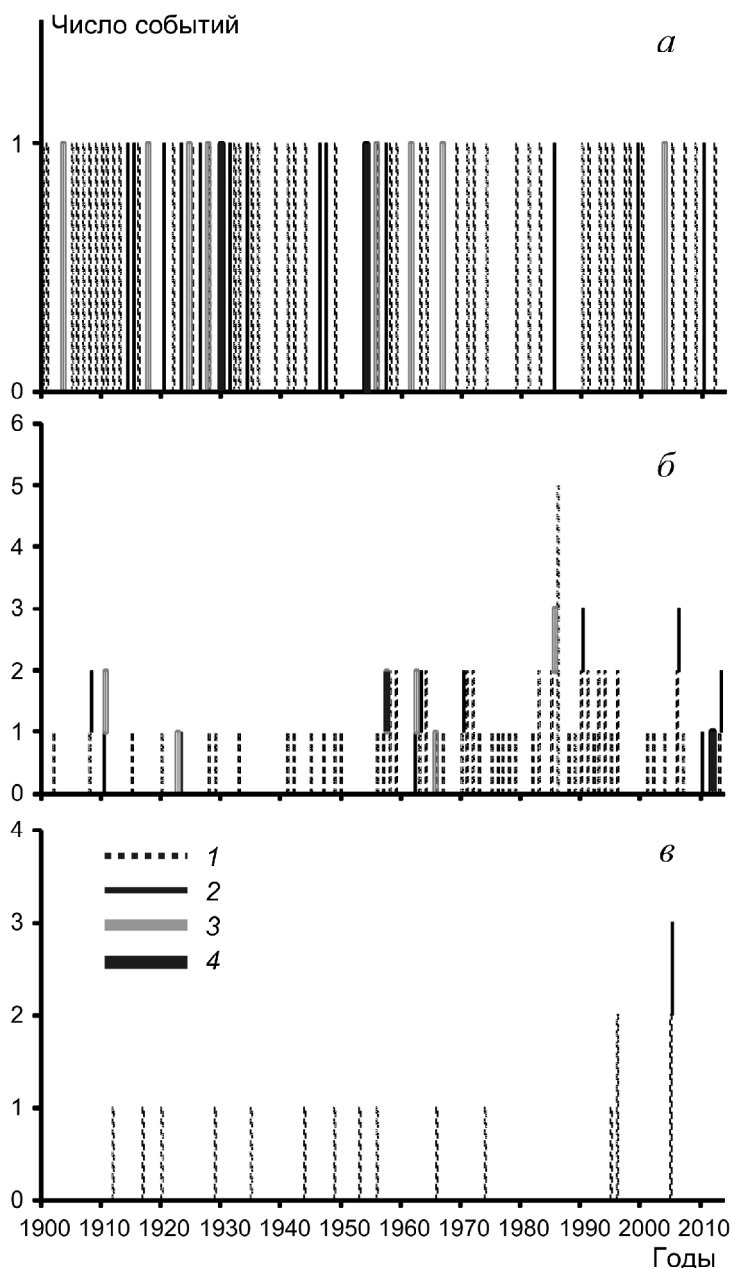


Рис. 4. Динамика стоково-заторных (а) и нагонных (б) наводнений, критических маловодий (в) в устье р. Северной Двины. Типы событий: 1 – умеренно опасные, 2 – опасные, 3 – особо опасные, 4 – катастрофические

Fig. 4. Dynamics of the river flow-ice-jam (a) and surge (b) floods and the critical low-water situations (c) in the Northern Dvina River mouth. Types of events: 1 – moderately hazardous, 2 – hazardous, 3 – extremely hazardous, 4 – disastrous

в межень, мощные заторы льда выше по течению (редкая ситуация), русловые процессы либо воздействие нескольких факторов одновременно. Сгонные и стоковые обмеления классифицируются как неблагоприятный и даже опасный гидрологический процесс при снижении $H_{мин}$ ниже критической отметки ($H_{крит}$) длительностью, как правило, не менее 10 сут. При русловых процессах опасность представляют не колебания уровня, а уменьшение глубины. Стоковые обмеления доминируют на придельтовом участке Сев. Двины, лимитируя главным образом навигацию. Они длятся с июля до начала зимней межени единым периодом или с перерывами, их сред-

няя и максимальная продолжительность – 34 и 132 сут. соответственно (пост Усть-Пинега). В течение 1916–2013 гг. она возросла с 29 сут. в первую его половину до 39 сут. во вторую. Главной причиной такой неблагоприятной тенденции стало статистически значимое ($F\text{-test}(+)$, $t\text{-test}(+)$, $SRC\bar{C} = -0,23(+)$), в несколько этапов снижение водности летне-осеннего меженного периода. Снижение летне-осенних значений $H_{\text{мин}}$ составило 4,3 см/10 лет ($SRC\bar{C} = -0,53(+)$). Та же закономерность наблюдается и в отношении зимней межени, хотя на навигацию это не влияет. К дельте интенсивность снижения $H_{\text{мин}}$ уменьшается из-за подпора от повышающегося уровня моря.

При сильных ветровых сгонах падение уровня в устье Сев. Двины бывает столь значительным, что возникают затруднения для судоходства, главным образом в дельте. Всего выявлено 17 случаев умеренно опасных ($H_{\text{с, мин}} < -10$ см) и опасных сгонов (рис. 4, в), 85% сгонов произошло в ноябре–феврале с пиками в декабре и феврале. Продолжительность сгонов примерно в 2 раза больше, чем у нагонов. Опасность ветровых сгонов постепенно уменьшается по мере подъема уровня моря. Многолетняя скорость повышения минимальных сгонных уровней составила 0,8 см/10 лет (пост Соломбала; 1905–2011) (рис. 3, г). Сведений об ущербах от сгонов, как и от стоковых обмелений, обнаружить не удалось.

Выводы:

- на устьевом участке Сев. Двины, несмотря на его арктическое положение, перечень ОГЯ большой и включает наводнения, ветровые сгоны и маловодья, заторы льда и зажоры, интенсивный ледоход, проникновение морских вод в дельтовые рукава. Для них нами собран уникальный и обширный массив разнообразных сведений;

- наибольший ущерб, с человеческими жертвами в прошлом, формируют речные наводнения и штормовые нагоны. В редких катастрофических случаях он сопоставим у обоих типов, но стоково-заторные наводнения часто сопровождаются заторами льда и интенсивным ледоходом, случаются при еще низких температурах воздуха и воды (апрель–май), длятся существенно дольше и охватывают не только дельту, но и придельтовый участок; 78% штормовых нагонов наблюдалось осенью, с пиком в октябре;

- многолетняя повторяемость стоково-заторных и нагонных наводнений в устье Сев. Двины довольно высокая – 71 и 72% соответственно, но основную их часть (68 и 80%) составляют умеренно опасные события. В многолетнем плане ситуация с разными типами наводнений развивается противоположным

образом. Повторяемость речных наводнений уменьшилась (на 25% после 1966 г.), перестали гибнуть люди, масштабы наводнений и их последствий снизились. Повторяемость заторов уменьшилась на 30%, как и их продолжительность. Это стало возможным благодаря, во-первых, реализации комплекса защитных, научно обоснованных и поэтому эффективных мер; во-вторых, вследствие естественных гидроклиматических изменений, в частности, потепления климата, снижения $Q_{\text{макс}}$, толщины речного льда и др. Число нагонных наводнений, наоборот, не уменьшается, а 14–16 ноября 2011 г. был отмечен штормовой нагон 1%-ной обеспеченности, нанесший социально-хозяйственному комплексу устья значительный ущерб. Основные причины этой неблагоприятной тенденции – повышение уровня моря и «смягчение» его ледового режима, усиление в атмосфере синоптической неустойчивости и др.;

- заметный, но пока не оцененный в денежном выражении ущерб формируют ветровые сгоны, стоковые понижения уровня в реке и дельтовых рукавах. Они затрудняют хозяйственную деятельность и ухудшают условия жизни населения и существования гидробионтов, но не вызывают разрушений, гибели людей и т.п. Как и в случае с наводнениями, многолетние тенденции у них разные. Частота и размеры стоковых обмелений, возможно, будут увеличиваться, создавая ограничения по водопользованию, главным образом на придельтовом участке и в летне-осенний сезон. Об этом свидетельствует увеличение продолжительности лимитирующего периода (с 29 до 39 дней), снижение расходов и уровней воды летне-осенней межени, а также характер климатических изменений (в том числе в будущем). Опасность ветровых сгонов, которых выявлено всего 17 (с ущербами), наоборот, уменьшается по мере подъема уровня моря;

- ситуация с ОГЯ в устье Северной Двины остается сложной, несмотря на принимаемые меры. Она требует применения не только дорогих инженерных защитных мер (некоторые из них нецелесообразны, например строительство противонагонного барьера), но и мер не инженерного плана. При последнем подходе упор, на наш взгляд, необходимо делать на повышение качества оперативных и среднесрочных прогнозов, развитие всех форм мониторинга гидрологических процессов, дальнейшее углубление знаний об ОГЯ, в том числе посредством их моделирования, создание невыгодных условий для заселения и освоения потенциально опасных территорий и др. К сожалению, пока ситуация противоположная.

Благодарности. Исследования выполнены за счет грантов РНФ (проект № 14-37-00038) и РФФИ (проект № 14-05-00949).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 6. С. 1–9.
- Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 14–31.
- Брызгалов В.В., Скибинский Л.Э., Богунов А.Ю. Исследование устьевой области реки Северной Двины хронокартографическим методом. Архангельск: Лодия, 2008. 143 с.
- Бусин М.В., Варфоломеев А.Ю., Марков Ю.В., Попов А.Н. Влияние паводка на состояние строительных объектов Архангельска // Арктика и Север. 2011. № 3. С. 169–180.
- Васильев Л.Ю. Весеннее наводнение и противозаторные мероприятия в устьевой области Северной Двины // Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий: Докл. VI Всеросс. гидрол. съезда. Москва, 2006. С. 223–229.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1017 с.
- Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. Ежегодное издание. Л.; СПб., 1982–2014.
- Грищенко И.В., Водовозова Т.Е. Тенденции в изменении климата и опасных явлений погоды на территории Архангельской области и Ненецкого автономного округа // Экология человека. 2011. № 6. С. 22–27.
- Гидрология устьевой области Северной Двины. М.: Гидрометеиздат, 1965. 376 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том II. Белое море. Вып. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
- Зайков Б.Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 135 с.
- Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 260 с.
- Лебедева С.В. Динамика потока в приливном многорукавном устье крупной реки (на примере р. Северная Двина): Автореф. канд. дисс. М., 2016. 25 с.
- Луначев Ю.В. Особенности проникновения соленой воды в приливное устье (на примере устья Северной Двины) // Тр. ГОИН. 1976. Вып. 129. С. 37–52.
- Луначев Ю.В., Макарова Т.А. Проникновение морских вод в рукава дельты Северной Двины и его возможные изменения // Тр. ГОИН. 1984. Вып. 172. С. 117–125.
- Луначев Ю.В., Скрипник Е.Н., Кучейко А.А. Опыт космического мониторинга развития весеннего половодья на реке Северная Двина в 2010 г. // Земля из космоса. 2010. Вып. 6. С. 57–68.
- Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 412 с.
- Национальный атлас России. Т. 2. Природа, экология. М.: Роскартография, 2007. 496 с.
- Полонский В.Ф., Кузьмина В.И. О распределении стока в дельте Северной Двины // Тр. ГОИН. 1986. Вып. 179. С. 49–56.
- Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины / Под ред. Р.С. Чалова. М.: ООО «Журнал «РТ», 2012. 492 с.
- Терский П.Н. Наводнения на реках бассейна Северной Двины: Автореф. канд. дисс. М., 2012. 24 с.
- Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Полякова А.Н. Опасные гидрологические явления в низовьях арктических рек России // Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. С. 355–390.
- Эстуарно-дельтовые системы России и Китая: гидролого-морфологические процессы, геоморфология и прогноз развития / Под ред. В.Н. Коротаева, В.Н. Михайлова, Д.Б. Бабича, Ли Цзунсяня, Лю Шугуана. М.: ГЕОС, 2007. 445 с.
- Magritsky D., Lebedeva S., Polonsky V., Skripnik E. Inundations in the delta of the Northern Dvina River // J. Geograph. institute «Jovan Cvijic» SASA. 2013a. Vol. 63, N 3. P. 133–145. DOI: 10.2298/JGHI1303133M.
- Magritsky D., Mikhailov V., Korotaev V., Babich D. Changes in hydrological regime and morphology of river deltas in the Russian Arctic // Proc. HP1, IAHS-IPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013b. IAHS Publ. 358 (Deltas: landforms, ecosystems and human activities). 2013. P. 67–79.
- Skripnik E.N. Monitoring ice and spring flood progress // Geoinformatics. 2013. Vol. 16, N 3. P. 10–12.

Поступила в редакцию 21.06.2016
Принята к публикации 26.07.2016

D.V. Magritsky¹, E.N. Skripnik²

HYDROLOGICAL HAZARDS IN THE MOUTH OF THE NORTHERN DVINA AND THE CAUSES OF THEIR LONG-TERM CHANGES

The results of detailed studies of hazardous hydrological processes in the mouth of the Northern Dvina river are presented. The focus is on the ice jams, inundations from both pure maximum stream flow and peak discharges with ice jams, storm surges and surge-induced flooding, dangerous wind-induced down-surges and low-water periods. The updated and new information on the location, frequency and magnitude of hydrological hazards, long-term variability of their characteristics are given. Long-term changes of hazardous hydrological processes in the mouth of the Northern Dvina river in the period 1900–2013 are analyzed. During this analysis, the features and patterns of long-term variations in water runoff and hydrological regime of the river, of the regime of the White sea, of the regional climatic conditions are taken into account. New estimates of the parameters of the hydrological regime river in its mouth are obtained. Conclusions on the spatial and temporal variability of these characteristics, the causes of variability are

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Hydrology, senior lecturer; e-mail: magdima@yandex.ru

² Federal State Budgetary Institution «Northern Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring»; e-mail: gidro@arh.ru

justified. Detailed information about the damages into the mouth of the Northern Dvina river caused by floods, about list and effectiveness of the measures of prevention and protection against ice jams and river flooding, new data on the structure and parameters of the mouth of the Northern Dvina are given.

Key words: river, sea, mouth, delta, hydrological regime, runoff and water levels, inundations, low-water periods, ice jams, storm surges, wind-induced down-surges, damage protective measures.

Aknowledgements. The study was supported by grants of the Russian Science Foundation (project № 14-37-00038) and Russian Foundation for Basic Research (project № 14-05-00949).

REFERENCES

- Agafonova S.A., Frolova N.L.* Osobennosti ledovogo rezhima rek bassejna Severnoj Dviny [Features of the ice regime of the Northern Dvina basin], *Vodnye resursy*, 2006, T. 33, no 6, pp. 1–9 (in Russian).
- Alekseevskii N.I., Magrickii D.V., Mihajlov V.N.* Antropogennye i estestvennye izmeneniya gidrologicheskikh ogranichenij dlya prirodopol'zovaniya v del'tah rek Rossijskoj Arktiki [Anthropogenic and natural changes in hydrological constraints to natural resources management in the deltas of the rivers of the Russian Arctic], *Vodnoe hozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2015, no 1, pp. 14–31 (in Russian).
- Bryzgalov V.V., Skibinskii L.E.H., Bogunov A.Yu.* Issledovanie ust'evoy oblasti reki Severnoj Dviny hronokartograficheskim metodom [Study of the mouth area of the Northern Dvina River with chrono-mapping method], *Arhangel'sk*, 2008, 143 p. (in Russian).
- Busin M.V., Varfolomeev A.Yu., Markov Yu.V., Popov A.N.* Vliyaniye pavodka na sostoyaniye stroitel'nykh ob'ektov Arhangel'ska [Effect of flood on state of the construction objects in Arkhangelsk], *Arktika i Sever*, 2011, no 3, pp. 169–180 (in Russian).
- Estuarno-deltovyye sistemy Rossii i Kitaya: gidrologo-morfologicheskie protsessy, geomorfologiya i prognoz razvitiya [Estuarine-deltaic system in Russia and China: the hydrological and morphological processes, geomorphology and forecast of evolution], *Moscow*, 2007, 445 p. (in Russian).
- Frolova N.L., Agafonova S.A., Polyakova A.N.* Opasnye gidrologicheskie yavleniya v nizov'yah arkticheskikh rek Rossii [Dangerous hydrological phenomena in the lower reaches of the Arctic rivers of Russia], *Geohkologicheskoe sostoyaniye arkticheskogo poberezh'ya Rossii i bezopasnost' prirodopol'zovaniya*, *Moscow*, 2007, pp. 355–390 (in Russian).
- Gidrologiya ust'evoy oblasti Severnoj Dviny [Hydrology of the Severnaya Dvina River mouth area], *Moscow*, 1965, 376 p.
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR [Hydrometeorology and hydrochemistry seas of the USSR], T. II, vyp. 1, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1991, 240 p. (in Russian).
- Gosudarstvennyy vodnyy kadastr. Resursy poverhnostnykh i podzemnykh vod, ih ispol'zovanie i kachestvo. Ezhegodnoe izdanie [The state water cadastre. Resources of surface and underground waters, their use and quality. Annual publication], Leningrad, Sankt-Peterburg, 1982–2014 (in Russian).
- Grishchenko I.V., Vodovozova T.E.* Tendencii v izmenenii klimata i opasnykh yavleniy pogody na territorii Arhangel'skoj oblasti i Neneckogo avtonomnogo okruga [Trends in climate change and danger weather phenomenon in the Arkhangelsk region and Nenets Autonomous District], *Ehkologiya cheloveka*, 2011, no 6, pp. 22–27 (in Russian).
- Katalog zatonykh i zazhorynykh uchastkov rek SSSR [The catalogue of ice-dam and ice-gorge reaches of the rivers of the USSR], T. 1, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1976, 260 p. (in Russian).
- Lebedeva S.V.* Dinamika potoka v prilivnom mnogorukavnom ust'e krupnoj reki (na primere r.Severnaya Dvina) [The dynamics of the flow in the tidal mouth of a large river with many branches (for example, Northern Dvina)], *Moskovskij Gosudarstvennyj Universitet*, *Moscow*, 2016, 25 p. (in Russian).
- Lupachev Yu.V.* Osobennosti proniknoveniya solenoi vody v prilivnoe ust'e (na primere ust'ya Severnoj Dviny) [Features of saltwater intrusion in tidal estuary (for example, the mouth of the Northern Dvina)], *Trudy GOIN*, 1976, vyp. 129, pp. 37–52 (in Russian).
- Lupachev Yu.V., Makarova T.A.* Proniknovenie morskikh vod v rukava del'ty Severnoj Dviny i ego vozmozhnye izmeneniya [The seawater intrusion into the branches of the delta of the Northern Dvina and its possible changes], *Trudy GOIN*, 1984, vyp. 172, pp. 117–125 (in Russian).
- Lupachev Yu.V., Skripnik E.N., Kuchejko A.A.* Opyt kosmicheskogo monitoringa razvitiya vesennego polovod'ya na reke Severnaya Dvina v 2010 g. [The Experience of Space Monitoring of the Spring Seasonal Flood on the Northern Dvina River in 2010], *Zemlya iz kosmosa*, 2010, Vypusk 6, pp.57–68 (in Russian).
- Magritsky D., Lebedeva S., Polonsky V., Skripnik E.* Inundations in the delta of the Northern Dvina River // *J. Geograph. institute «Jovan Cvijik» SASA*. 2013a. Vol. 63, N 3. P. 133–145. DOI: 10.2298/IJGI1303133M.
- Magritsky D., Mikhailov V., Korotaev V., Babich D.* Changes in hydrological regime and morphology of river deltas in the Russian Arctic // *Proc. of HP1, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly*, Gothenburg, Sweden, July 2013b. IAHS Publ. 358 (Deltas: landforms, ecosystems and human activities). 2013. P. 67–79.
- Mihajlov V.N.* Ust'ya rek Rossii i sopredel'nykh stran: proshloe, nastoyashchee i budushchee [The mouths of the rivers of Russia and adjacent countries: past, present and future], *Moscow*, 1997, 412 p. (in Russian).
- Nacional'nyy atlas Rossii [The National Atlas of Russia], T. 2, *Moscow*, 2007, 496 p. (in Russian).
- Polonskiy V.F., Kuz'mina V.I.* O raspredelenii stoka v del'te Severnoj Dviny [On the distribution of runoff in the delta of the Northern Dvina], *Trudy GOIN*, 1986, vyp. 179, pp. 49–56 (in Russian).
- Ruslovye processy i vodnye puti na rekah bassejna Severnoj Dviny [Channel processes and waterways on the rivers of the Northern Dvina basin], *Moscow*, 2012, 492 p. (in Russian).
- Terskiy P.N.* Navodneniya na rekah bassejna Severnoj Dviny [Floods on the rivers of the Northern Dvina basin], *Moskovskij Gosudarstvennyj Universitet*, *Moscow*, 2012, 24 p. (in Russian).
- Skripnik E.N.* Monitoring ice and spring flood progress // *Geoinformatics*. 2013. Vol. 16, N 3. P. 10–12.
- Vasil'ev L.Yu.* Vesennee navodnenie i protivozatornye meropriyatiya v ust'evoy oblasti Severnoj Dviny [Spring inundation and ice-dam control measures in the mouth area of the Northern Dvina], *Navodneniya i drugie opasnye gidrologicheskie yavleniya: oценка, prognoz i smyagchenie negativnykh posledstvij*, *Doklady VI Vserossijskogo gidrologicheskogo s'ezda*, *Moscow*, 2006, pp. 223–229 (in Russian).
- Vtoroj ocenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The second assessment report of the Hydromet about climate change and their impact on the territory of the Russian Federation], *Moscow*, Rosgidromet, 2014, 1017 p. (in Russian).
- Zajkov B.D.* Vysokie polovod'ya i pavodki na rekah SSSR za istoricheskoe vremya [High snowmelt floods and rain floods on the rivers of the USSR for the historical time], Leningrad, Gidrometeoizdat, 1954, 135 p. (in Russian).

Received 21.06.2016

Accepted 26.07.2016