

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕТЕРОТРОФНОГО БАКТЕРИОПЛАНКТОНА В ВОДЕ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ Р. СЕВЕРНАЯ ДВИНА

Забелина С.А.¹, Воробьева Т.Я.¹, Морева О.Ю.¹, Чупакова А.А.¹, Климов С.И.¹,
Широкова Л.С.¹

ФИЦКИА РАН Институт экологических проблем Севера, Архангельск, e-mail: svetzabelina@gmail.com

Представлены результаты изучения особенностей распределения и динамики содержания различных эколого-трофических групп гетеротрофного бактериопланктона в воде устьевой области р. Северная Двина в летнюю межень 2009, 2012, 2013 гг. в зависимости от гидролого-гидрохимических факторов среды и от степени загрязнения акватории. Установлено, что динамика численности и трофическая структура гетеротрофного бактериопланктона тесно связаны с процессами, происходящими в условиях маргинального фильтра, распределением РОВ и процессами его трансформации. На разных этапах маргинального фильтра доминируют различные группы гетеротрофных бактерий, осуществляя процессы самоочищения экосистемы от органических веществ автохтонного и аллохтонного происхождения, поддерживая тем самым устойчивость экосистемы. В периоды наблюдений с 2009 по 2013 гг. содержание ГБ находилось в пределах среднедолгосрочных значений.

Ключевые слова: устьевая область, гетеротрофный бактериопланктон, эколого-трофическая группа, численность

FEATURES OF THE HETEROTROPHIC BACTERIOPLANKTON DISTRIBUTION IN THE WATER OF THE NORTHERN DVINA RIVER MOUTH AREA

Zabelina S.A.¹, Vorobieva T.Ya¹, Moreva O.Yu.¹, Chupakova A.A.¹, Klimov S.I.¹,
Shirokova L.S.¹

¹Institute of ecological problems of the Federal Center for Integrated Arctic Research RAS, Arkhangelsk, e-mail: svetzabelina@gmail.com

The results of studies of the quantitative distribution of the structure and dynamics of heterotrophic bacterioplankton water of the Northern Dvina mouth area in summer 2009, 2012, 2013. depending on the hydrological and hydro-chemical factors of the environment and on the degree of pollution of waters are presented. It was found that the population dynamics and trophic structure of heterotrophic bacterial closely related to the processes taking place in the conditions of marginal filter, the distribution of DOM and its transformation processes. At different stages of the marginal filter dominated by different groups of heterotrophic bacteria, exercising self-purification processes of the ecosystem of the autochthonous and allochthonous origin organic matter. During the reporting period from 2009 to 2013 GB of content is in the range of mean values.

Keywords: mouth area, heterotrophic bacterioplankton, ecological-trophic group number

В последние десятилетия большое внимание уделялось изучению процессов трансформации речных растворенных и взвешенных веществ в переходной зоне река—море — маргинальных фильтрах [7]. В данной зоне происходят смешение и трансформация двух различных по физическим, химическим и биологическим свойствам водных масс — речной и морской. Вследствие больших пространственно-временных градиентов всех физико-химических характеристик водных масс и биологических компонентов экосистемы устьевые области рек — весьма уязвимые с экологической точки зрения природные объекты. Важная роль в трансформации органического вещества принадлежит гетеротрофным бактериям (ГБ), заселяющим различные экологические ниши в водной экосистеме и являющимся первичными деструкторами растворенного органического вещества (РОВ) и органического

вещества взвеси, а также единственной группой организмов, осуществляющей рециклинг биогенных элементов. Минерализация РОВ гетеротрофными бактериями составляет значительную часть биогеохимического цикла углерода.

Устьевая область р. Северная Двина является объектом многочисленных исследований ее гидрохимического состояния, однако изучению современного состояния бактериопланктона, в особенности зоны смешения речных и морских вод, уделяется недостаточно внимания, только в последние годы стали появляться публикации по данной теме [2, 6]. Получение таких характеристик микробного сообщества, как численность, структура и сезонная динамика эколого-трофических групп микроорганизмов, является важным инструментом для понимания и объяснения происходящих в водной экосистеме процессов. В 1999–2003 гг. проводились исследования содержания бактериопланктона в воде р. Северная Двина, которые выявили закономерности распространения ГБ, в том числе аллохтонных, в экосистеме устья р. Северная Двина [1, 5]. В устье р. Северная Двина на границе река—море М.Д. Кравчишиной с соавт. [6] проводилось изучение концентрации взвеси и общей численности микроорганизмов (ОЧМ), учитываемой прямым счетом на мембранных фильтрах, в поверхностном слое воды в летнюю межень. Авторами были установлены изменения содержания взвеси и ОЧМ на трех ступенях маргинального фильтра.

Цель исследования

Целью данной работы являлось изучение особенностей количественного распределения и динамики структуры гетеротрофного бактериопланктона, показателей деструкции органического вещества автохтонного и аллохтонного происхождения, воды устьевой области р. Северная Двина, включая зону смешения пресных и соленых вод, в зависимости от гидролого-гидрохимических факторов среды и от степени загрязнения акватории.

Материалы и методы

Устьевая область р. Северная Двина охватывает обширный участок нижнего течения реки от впадения реки Пинега до морского края дельты и юго-восточную часть Двинского залива Белого моря. Верхняя граница устьевой области проходит у устья р. Пинега, где уже не отмечаются приливные колебания уровня. Морская граница проходит по свалу глубин, примерно по 8-метровой изобате. Устьевая область р. Северная Двина делится на три части: 1) приустьевой участок реки (от устья р. Пинеги до Архангельска); 2) дельта (по линии Архангельск — о. Кумбыш); 3) устьевое взморье, представляющее собой мелководную часть Двинского залива, с площадью в принятых границах (по 8-метровой изобате) [4].

Отбор проб воды и измерения гидрофизических, гидрохимических и микробиологических характеристик вод производили в периоды летней межени 2009, 2012,

2013 гг. с борта плавсредства (рис. 1). Измерение концентрации растворенного в воде кислорода и температуры осуществляли при помощи зонда-оксиметра WTW Oxi 330i, pH определяли с помощью pH-метра HANNA HI8314F, удельную электропроводность как функцию общей минерализации и солености – портативным кондуктометром HANNA HI8733 и гидрозондом Hydrolab MS5.

Для микробиологического анализа пробы воды отбирали в стерильные склянки батометром Нискина с соблюдением всех асептических правил отбора, время хранения проб не превышало 4 ч в переносном холодильнике. Микробиологические анализы проводились общепринятыми методами исследований [10].

Численность эколого-трофических групп с различными пищевыми потребностями в составе гетеротрофного бактериопланктона определяли на агаризованных средах: группу эвтрофных бактерий (ЭБ) определяли при посеве глубинным способом на стандартный мясопептонный питательный агар, группу факультативно-олиготрофных бактерий (ФОБ) – на среде Горбенко (МПА:10), олиготрофных бактерий (ОБ) – на голодном агаре. Воду из исследуемого водоема засеивали на чашки Петри от 0,1 мл до 1 мл в зависимости от степени загрязненности. Посев проб воды из зоны смешения осуществляли на среды с соответствующей соленостью.

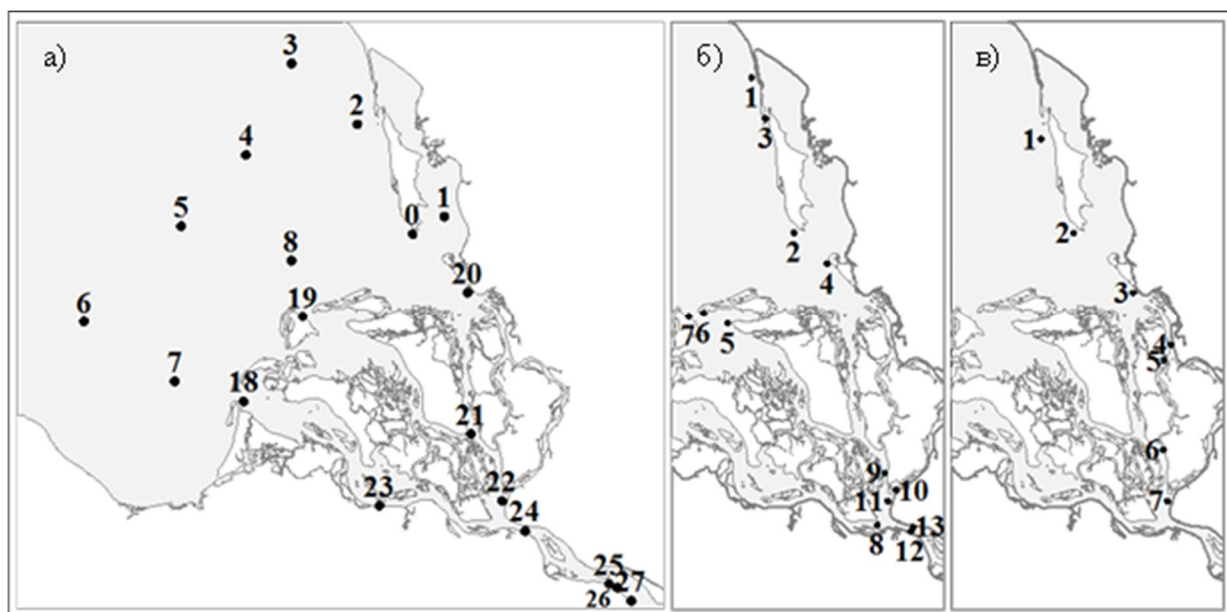


Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб воды в устьевой области 2009 (а), 2012 (б), 2013 (в) гг.

В комплекс гидрохимических наблюдений входило определение биогенных элементов: фосфатов (PO_4^{3-}), аммонийного азота (NH_4^+), нитратов (NO_3^-), нитритов (NO_2^-) [11].

Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием статистического пакета программ STATISTICA 10. Для выявления взаимосвязей

гетеротрофных бактерий с абиотическими факторами среды использовали непараметрический корреляционный анализ (ранговая корреляция Спирмена) ввиду несоответствия исследуемых рядов данных нормальному закону распределения.

Результаты и обсуждение

Гидрохимический режим р. Северная Двина отражает природные особенности региона [12]. Значительная заболоченность бассейнов беломорских рек обуславливает поступление в реки большого количества РОВ. Среднемноголетняя концентрация растворенного органического углерода (РОУ) в р. Северная Двина колеблется, по данным разных авторов, от 12 до 20 мг/л [13, 14]. В летнюю межень концентрации РОУ в воде р. Северная Двина находятся в пределах 9–18 мг/л в пресноводной части, в зоне смешения речных и морских вод отмечена прямая взаимосвязь с соленостью вод, концентрация РОУ уменьшается в 3–3,5 раза при солености 25–27 ‰ [14].

В исследуемые периоды летней межени гидролого-гидрохимические показатели устьевой области р. Северная Двина характеризуются пространственной изменчивостью. Содержание растворенного кислорода характерно для данных периодов наблюдений и варьирует в диапазоне от 72 до 101% насыщения (или значений от 6,00 до 9,25 мг/л). Значения рН среды устьевой области реки колеблются в широком интервале — от 6,93 до 8,11, для пресной воды интервал значений уже — 7,27–7,91. В пресноводной части реки электропроводность была в пределах 277–351 мкСм/см.

Содержание биогенных элементов в устьевой области р. Северная Двина и в зоне смешения морских и речных вод Двинского залива Белого моря имеет характерную для данного района исследований динамику [13]. Концентрация нитритов минимальна — значения от 0,2 до 7,8 мкгN/л, содержание аммонийного азота колебалось в пределах от 0,9 до 107,6 мкгN/л, нитратов — в пределах 59,3–240,8 мкгN/л. Содержание фосфатного фосфора изменялось в интервале 4,3–49,3 мкгP/л, максимальные концентрации характерны для станций, подверженных антропогенному влиянию, и для зоны смешения речных и морских вод. В пресноводной части реки концентрация фосфатов была в пределах 15,9–29,1 мкгP/л, минерального азота — в пределах 67,5–249,2 мкгN/л с преобладанием нитратной формы. В летнюю межень 2012, 2013 гг. концентрация минерального азота была несколько ниже (67,5–155,13 мкгN/л) по сравнению с этим периодом 2009 г.

Численность ГБ в устьевой области реки варьировала в широких пределах: ЭБ — от 20 до 3350 (медиана 440) КОЕ/мл, ФОБ — от 60 до 7360 (медиана 860) КОЕ/мл, ОБ — от 65 до 6120 (медиана 860) КОЕ/мл. Наиболее загрязненными участками по микробиологическим показателям являются станции в черте г. Архангельска (ст. 22, 24), здесь обнаружено максимальное содержание всех изученных групп бактерий. Более высокие концентрации

гетеротрофного бактериопланктона выявлены также в 0,5 км ниже сброса сточных вод АЦБК (ст. 26) по левому берегу реки (ЭБ – 1000 КОЕ/мл, ФОБ – 1800 КОЕ/мл, ОБ – 4300 КОЕ/мл).

Наиболее высокие вариации численности ЭБ отмечены в дельте (табл.). Наименьшая численность наблюдалась в районе о. Кумбыш как в 2009 г. (ст. 19), так и в 2012 г. (ст. 7) (соответственно 55 КОЕ/мл и 150 КОЕ/мл). Максимальная численность ЭБ и ФОБ в дельте наблюдалась в Никольском рукаве (ст. 18) (соответственно 1780 и 6240 КОЕ/мл), что вызвано влиянием речного стока Никольского рукава, а также в протоке Маймакса (соответственно 1920 и 7360 КОЕ/мл). По мере приближения к устьевому взморью численность ЭБ снижается в 3–4 раза (до 150–250 КОЕ/мл) вследствие смешения речных и морских вод, содержащих меньшее количество бактерий. Для гетеротрофных бактерий, растущих на обедненных средах, характерна более высокая и сложная изменчивость, зависящая от гидродинамики вод конкретного района. Наибольшие вариации численности ФОБ наблюдались в дельте и устьевом взморье, ОБ — в устьевом взморье.

Содержание эколого-трофических групп бактериопланктона в устьевой области Северной Двины в летнюю межень 2009, 2012, 2013 гг. (над чертой — минимальные и максимальные значения, под чертой — медиана)

Станция отбора	Приустьевая зона	Дельта	Устьевое взморье
ЭБ, КОЕ/мл	<u>410–3350</u> 1440	<u>55–1920</u> 440	<u>20–570</u> 310
ФОБ, КОЕ/мл	<u>450–4560</u> 2270	<u>170–7360</u> 1000	<u>60–2600</u> 570
ОБ, КОЕ/мл	<u>370–4300</u> 810	<u>220–6120</u> 1440	<u>65–3480</u> 520

Численность ФОБ, ОБ в зоне смешения варьирует соответственно от 60 до 7360 КОЕ/мл, от 65 до 6120 КОЕ/мл. В зоне смешения наблюдалась вертикальная стратификация вод, характерная для Двинского залива [3]. В верхнем слое, содержащем трансформированные речные воды Северной Двины, соленость была от 1,19 до 11,91‰. В придонном слое наблюдалось присутствие вод с соленостью 25‰, характерной для вод Двинского залива. Соответственно и численность ЭБ, ФОБ и ОБ в придонном горизонте была в 1,5, 3 и 2 раза ниже, чем в поверхностном. Соотношение численности различных групп ГБ в морских водах отличается незначительно.

В период летней межени 2012 г. проведено более детальное изучение содержания и эколого-трофической структуры ГБ в зависимости от РОУ на станциях устьевой области, которые располагались в акваториях, наиболее контрастных по условиям среды: от Усть-

Пинеги — верхней границы устьевой области, где не отмечаются приливные колебания уровня, до устьевоего взморья (рис. 2).

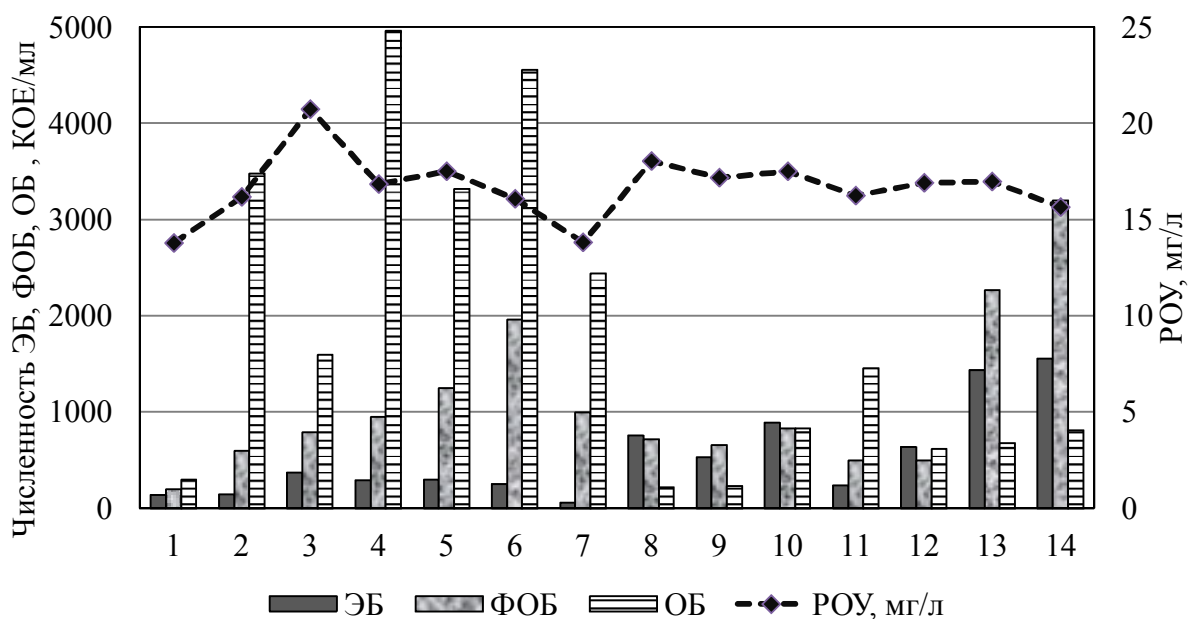


Рис. 2. Распределение различных эколого-трофических групп гетеротрофного бактериопланктона в устьевой области Северной Двины в летнюю межень 2012 г. в зависимости от РОУ

В зоне смешения морских и речных вод и в вершине Двинского залива (ст. 2–7) преобладали ОБ (от 53 до 88%), антропогенно нагруженные участки реки (ст. 8–10, 12–13) характеризовались преобладанием бактерий, усваивающих высокие и умеренные концентрации органического вещества (ЭБ и ФОБ) (соответственно 35–45% и 42–52%). В морских водах (ст. 1) наблюдалась наименьшая численность всех изученных групп бактерий (ЭБ — 140 КОЕ/мл, ФОБ — 200 КОЕ/мл, ОБ — 300 КОЕ/мл). Вода Северной Двины в районе Усть-Пинеги (ст. 14) также характеризовалась преобладанием ЭБ и ФОБ (соответственно 28 и 57%), а также относительно высокой численностью гетеротрофного бактериопланктона (ЭБ — 1560 КОЕ/мл, ФОБ — 3200 КОЕ/мл) по сравнению с основным руслом Северной Двины, что, вероятно, связано с тем, что данный район также является геохимическим барьером, где смешиваются воды рек Пинега и Северная Двина.

Экологическая структура микробного сообщества в зоне смешения морских и речных вод характеризуется преобладанием автохтонных ФОБ и ОБ. Увеличение численности ГБ, растущих на обедненных средах, вероятно, вызвано поступлением в среду автохтонных РОУ, образующихся при отмирании при данной солености воды как пресноводного, так и морского планктона [6]. Как видно из графика (рис. 2), взаимосвязь ФОБ и ОБ с РОУ неочевидна. Вероятно, более значимым для данных групп бактериопланктона является содержание истинно растворенного углерода (<1 нм). В работе O.S. Pokrovsky et al (2014)

[14] было установлено увеличение концентрации низкомолекулярных (<1 нм) биодоступных лабильных форм растворенного органического углерода в зоне смешения морских и речных вод, что хорошо согласуется с данными о содержании и структуре гетеротрофных бактерий, в этой зоне возрастает численность представителей автохтонной части гетеротрофов (ФОБ и ОБ).

Зависимость активности гетеротрофного бактериопланктона, отражением которой является его численность, от абиотических факторов среды оценивали по значениям коэффициентов ранговой корреляции Спирмена. В связи со сложностью изучаемого объекта развитие бактериопланктона и его связь с абиотическими факторами имеет свои особенности в различных районах исследования.

Результаты корреляционного анализа показали, что для пресных вод отрицательная статистически значимая связь выявлена между численностью ЭБ и ФОБ с концентрацией нитритного азота ($R=-0,92$, $p<0,05$ и $R=-0,78$, $p<0,05$ $n=9$), ЭБ — с концентрацией аммонийного азота ($R=-0,58$, $p<0,1$ $n=9$). В дельте статистически значимая связь выявлена между численностью ЭБ и ОБ с концентрацией нитритного азота ($R=0,36$, $p<0,1$ и $R=-0,43$, $p<0,05$ $n=23$), ФОБ и ОБ — с концентрацией аммонийного азота ($R=0,75$, $p<0,05$ и $R=-0,47$, $p<0,05$ $n=20$), что может свидетельствовать об участии данных групп гетеротрофных бактерий в процессах нитрификации, источником для которой служит азот аммония. Для зоны смешения морских и речных вод для факультативно-олиготрофных бактерий выявлена взаимосвязь с фосфатами ($R=0,55$, $p<0,05$ $n=23$) и отрицательная взаимосвязь между представителями эвтрофной группы бактерий и соленостью ($R=-0,55$, $p<0,05$, $n=23$), положительная взаимосвязь между ОБ и соленостью ($R=0,65$, $p<0,05$, $n=23$). Для вод устьевого взморья статистически значимая отрицательная связь выявлена только между численностью ОБ и соленостью ($R=-0,55$, $p<0,05$, $n=17$).

Вследствие высокой чувствительности к изменениям условий окружающей среды численность бактериопланктона отражает гидролого-гидрохимическую ситуацию, сложившуюся в конкретном районе в определенный момент времени, поэтому при анализе связей численности бактерий с абиотическими параметрами не всегда возможно выявление общих закономерностей.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что динамика численности и трофическая структура гетеротрофного бактериопланктона связаны с процессами, происходящими в условиях маргинального фильтра, распределением РОВ и процессами его трансформации. В зоне смешения морских и речных вод резко возрастает численность представителей автохтонной части гетеротрофов (ФОБ и ОБ) за счет обогащения зоны

смешения наиболее лабильной (и потенциально биодоступной) фракцией органического углерода [14], образующегося при отмирании как пресноводного, так и морского планктона при промежуточных соленостях среды. Кроме того, увеличение количества детрита в процессе отмирания планктона дает возможность бактериям активизировать процессы минерализации растворенного и взвешенного вещества, поскольку прикрепленные к субстрату микроорганизмы имеют повышенную физиологическую активность. На разных этапах маргинального фильтра доминируют различные группы гетеротрофных бактерий, осуществляя процессы самоочищения экосистемы от ОВ автохтонного и аллохтонного происхождения, поддерживая тем самым устойчивость экосистемы. Уникальная способность микроорганизмов к быстрой адаптации в изменяющихся условиях среды благодаря высоким темпам размножения и широкому спектру ферментативной активности позволяет им быстро реагировать на смену экологических условий. Количественные характеристики и структура ГБ отражают динамические изменения условий окружающей среды, являясь наиболее чувствительными индикаторами ее состояния. В соответствии с эколого-санитарной классификацией качества поверхностных вод суши [9] по показателям гетеротрофного бактериопланктона качество воды устьевой области можно отнести к разряду вод удовлетворительной чистоты. В периоды наблюдений с 2009 по 2013 гг. содержание ГБ находилось в пределах среднемноголетних значений [1, 5].

Дальнейшие детальные сезонные исследования распределения ГБ в зависимости от гидролого-гидрохимических факторов среды помогут предсказать динамические изменения в экосистеме в условиях возрастающего антропогенного воздействия и изменения климата.

Работа проведена при поддержке ФАНО России в рамках проекта № 0410-2014-0030, РАН № 0410-2015-0027, РФФИ и Правительства Архангельской области № 14-05-9884-15.

Список литературы

1. Воробьева Т.Я. Пространственно-временная структура гетеротрофного бактериопланктона экосистемы устьевой области реки Северная Двина : дис... канд. биол. наук. – Архангельск, 2005. – 165 с.
2. Воробьева Т.Я. Пространственно-временная изменчивость структуры планктонных сообществ экосистемы устья Северной Двины / Воробьева Т.Я., Собко Е.И., Забелина С.А. // Вестник Поморского университета. – 2010. – № 3. – С. 36–42.
3. Воробьева Т.Я., Собко Е.И., Лебедев А.А. Структура и пространственная динамика фито- и зоопланктона устьевой области реки Северной Двины в летний период // Геология

морей и океанов. Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. (Москва, 14–18 ноября 2011 г.). – Т. 3. – С. 120–124.

4. Гидрология устьевой области Северной Двины // под ред. Зотина М.И., Михайлова В.Н. – М.: Гидрометеорологическое издательство (отделение). – 1965. – 241 с.

5. Забелина С.А. Состояние сообществ дрожжеподобных грибов устьевой области реки Северная Двина в условиях многолетнего микробиологического загрязнения : дис... канд. биол. наук. – Архангельск, 2005. – 137 с.

6. Кравчишина М.Д., Мицкевич И.Н., Веслополова Е.Ф., Шевченко В.П., А.П. Лисицын. Взаимосвязь взвеси и микроорганизмов в водах Белого моря / Океанология. – 2008. – Т. 48. № 6. – С. 900–917.

7. Лисицын А.П., Маргинальный фильтр океанов / Океанология. – 1994. – Т. 34. № 5. – С. 735–747.

8. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов // под ред. Сапожникова В.В. – М.: ВНИРО, 1988. – 119 с.

9. Оксийук О.П., Жукинский В.Н. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши / Гидробиологический журнал. – 1993. – Т. 29. – Вып. 4. – С. 62–76.

10. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем // под ред. д.б.н. Абакумова В.А. — СПб.: Гидрометеоздат, 1992. — 318 с.

11. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. – М.: Изд-во ВНИРО, 2003. – 202 с.

12. Система Белого моря: В 3 т. – М.: Научный мир. – 2010. – Т. 1. – 480 с.

13. Система Белого моря: В 3 т. – М.: Научный мир. – 2012. – Т. 2. – 784 с.

14. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Viers J. et al. Fate of colloids during estuarine mixing in the Arctic // Ocean Science. 2014. Vol. 10. № 1. С. 107–125.