

УДК 504.4.054

DOI: 10.17277/voprosy.2020.01.pp.009-018

### О ВЛИЯНИИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА НА РАЗБАВЛЕНИЕ ОЧИЩЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ПРИ ВЫПУСКЕ В МОРСКИЕ АКВАТОРИИ

**С. А. Безбородов**

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный  
университет», г. Владивосток, Россия*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор Н. В. Земляная*

**Ключевые слова:** выпуск сточных вод; ледовый покров; морские акватории.

**Аннотация:** Представлены результаты натурных исследований береговых и глубоководных выпусков очищенных сточных вод в акваториях бухт Амурского залива и о. Русский. Полученные данные натурных исследований сопоставлены с расчетами, выполненными по действующим нормативным методикам, оценивающим экологическую безопасность по степени разбавления сточных вод морскими. Результаты работы показали, что реальное снижение концентраций поллютантов существенно ниже расчетных значений.

Исследования распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в морских акваториях, покрытых льдом, представляют большой практический интерес. Понимание процессов переноса и трансформации загрязнений в периоды ледостава востребовано в условиях активного освоения арктического побережья и при реализации долгосрочных прогнозов качества воды, без которых невозможно рациональное планирование хозяйственной деятельности. Кроме того, существующая практика определения требуемой степени очистки сточных вод по наихудшим условиям сброса, в отсутствие данных о процессах, происходящих подо льдом, может привести к недооценке экологической опасности.

---

Безбородов Сергей Александрович – старший преподаватель кафедры инженерных систем зданий и сооружений, e-mail: bezborodovsa@gmail.com, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» г. Владивосток, Россия.

Детальные исследования подледных выпусков сточных вод в морские акватории в нашей стране практически не проводились, притом, что на практике как глубоководные, так и береговые выпуски реализованы во многих дальневосточных морях, для которых продолжительность ледостава составляет 4–5 месяцев. Достаточно большой объем данных накоплен зарубежными исследователями при реализации арктических программ [1, 2].

Обобщая известные работы, посвященные выпускам очищенных сточных вод в перемерзающие акватории, можно прийти к выводу, что наличие ледового поля в месте сброса, безусловно, оказывает влияние на картину распространения ЗВ. Это влияние по типу воздействия можно условно разделить на два вида: во-первых, при наличии ледового поля отсутствует ветровое перемешивание и в водоемах могут формироваться особые условия (стратификация, циркуляционные течения и пр.), способствующие накоплению ЗВ или их вытеснению новыми порциями сточной воды; во-вторых, нижняя поверхность льда создает шероховатость, аналогичную шероховатости на дне, что изменяет профиль скорости, который в свою очередь приводит к изменению характера распространения струи сточной жидкости. К подобным выводам пришли авторы работы [3], добавляя к указанным воздействиям структуру нижней поверхности льда (наличие торосов и пр.), а также эффекты прилипания струи к нижней поверхности льда. Авторами отмечено, что указанные положения являются гипотезами, а детальные исследования по данному вопросу не проводились.

В современной практике определения допустимых антропогенных нагрузок на водные объекты в России применяют «Методику расчета нормативно допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты», утвержденную приказом Министерства природных ресурсов РФ от 17.12.2007 г. № 333 [4].

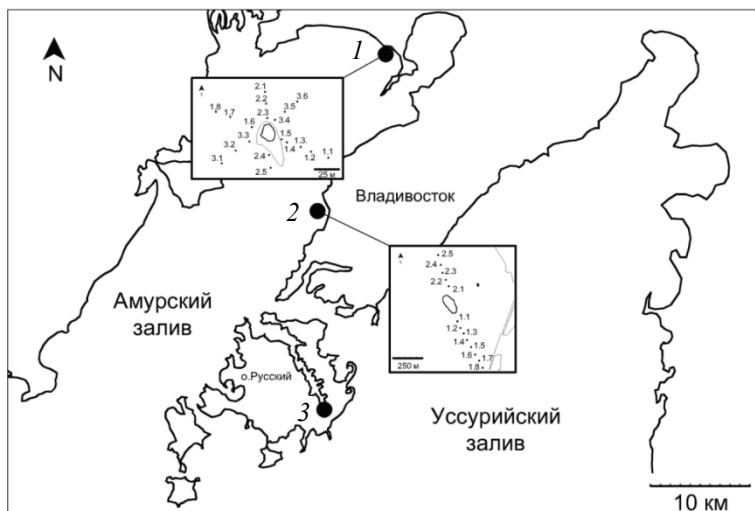
Согласно действующим рекомендациям, норматив допустимого сброса (НДС), в который входят расход сточных вод и их концентрация по набору ингредиентов, определяется степенью разбавления. Разбавление в свою очередь разделяют на начальное (струйное), за которое несет ответственность избыточный импульс струи сбросного устройства, и диффузионное, связанное с турбулентностью принимающего сточные воды потока. Струйное разбавление формирует поле концентраций в локальной зоне около выпуска, зависит от его конструкции и, следовательно, является управляемым. Диффузионное разбавление определяется турбулентностью моря, которая характеризуется коэффициентом турбулентной диффузии в конкретной акватории.

Указанные обстоятельства делают актуальной задачу определения величин НДС в морских акваториях, характеризующихся наличием устойчивого ледового покрова в холодный период года.

Несмотря на то что в методике [4] отсутствуют прямые рекомендации по расчету подледных выпусков во внутренние моря, частично вопросы выпуска сточных вод в периоды ледостава решены для других водных объектов. В частности, для рек отмечается снижение коэффициента турбулентной диффузии за счет трения воды о нижнюю поверхность льда, а для случая выпуска сточных вод в озера и водохранилища дано прямое указание для разработки методов расчета НДС в периоды ледостава: при-

влекать «специализированные научно-исследовательские организации, ориентированные на решение конкретных задач».

Для установления качественных характеристик морской среды при длительном выпуске очищенных стоков в период 2015 – 2018 гг. проведена серия натуральных исследований. В качестве объектов исследования определены береговые и глубоководные выпуски канализационных очистных сооружений (КОС) г. Владивостока (рис. 1). Ниже дана краткая характеристика объектов исследования. Характеристики глубоководных выпусков сведены в табл. 1.



**Рис. 1. Схема расположения выпусков сточных вод г. Владивостока с указанием мест проведения натуральных исследований:**  
 1, 2 – глубоководные выпуски КОС «Северные» и «Центральные»;  
 3 – береговой выпуск КОС ДВФУ

Таблица 1

**Характеристики выпусков очищенных сточных вод  
 КОС г. Владивостока**

Наименование характеристики	КОС	
	«Северные»	«Центральные»
Конструктивное решение выпуска	Рассеивающий	
Материал выпуска	Сталь	
Диаметр выпуска, мм	830	1600
Длина выпуска, м	1300	1200
Количество оголовков, шт	3	5
Шаг оголовков, м	4	5
Диаметр оголовков, мм	300	800
Глубина моря в месте выпуска, м	2,5	10,4
Скорость течения в месте выпуска, м/с	≈ 0	
Расход сточных вод, м <sup>3</sup> /сут	14231	79032
Проектная производительность КОС, м <sup>3</sup> /сут	57000	160000
Температура сточных вод перед выпуском, °С	4	15

Станция очистки сточных вод КОС «Северные» построена по классической схеме и включает в себя сооружения механической, биологической, глубокой очистки и обеззараживания сточных вод. В 2017 г. силами краевого государственного унитарного предприятия «Приморский водоканал» проведены работы по интенсификации удаления биогенных элементов, заключающиеся в переводе первичных отстойников в режим частичной ацидофикации, а также выделении аноксидной зоны в общем объеме аэротенка.

Канализационные очистные сооружения «Центральные» производительностью 160 тыс. м<sup>3</sup>/сут. расположены в долине одного из левых притоков Второй Речки. Технологическая схема очистки решена без использования первичного отстаивания и включает в себя сооружения механической очистки (решетки, горизонтальные песколовки); денитрификаторы, совмещенные с аэротенками карусельного типа; вторичные горизонтальные отстойники; фильтры доочистки и установки ультрафиолетового обеззараживания.

Разность солености очищенных сточных и морских вод позволила использовать для установления картины загрязнения метод индикаторов, сущность которого заключается в установлении распределения загрязняющих веществ в месте сброса сточных вод по изменению электропроводности морской воды. Используемая при проведении натурных исследований методика представлена в работе [5].

Отборы проб проводились в периоды ледостава – со льда из пробуренной лунки, открытой воды – с борта надувной лодки. Пробы отбирались батометром рывкового типа с нескольких горизонтов воды (у дна, на половине глубины и верхнем слое). При отборе фиксировались глубина, температура воды, толщина льда, а также с помощью GPS-приемника места отбора проб. После отбора пробы доставлялись в лабораторию и сразу анализировались. При помощи кондуктометра определялась электропроводность воды, которая по известным зависимостям пересчитывалась в соленость. Фоновая соленость морской воды определялась на удалении не менее 1000 м от места выпуска.

По результатам натурных исследований построены диаграммы солености морской воды в местах выпуска, приведенные на рис. 2.

По результатам анализа данных, полученных в ходе натурных исследований в месте выпуска КОС «Северные» (см. рис. 2, а), установлено следующее:

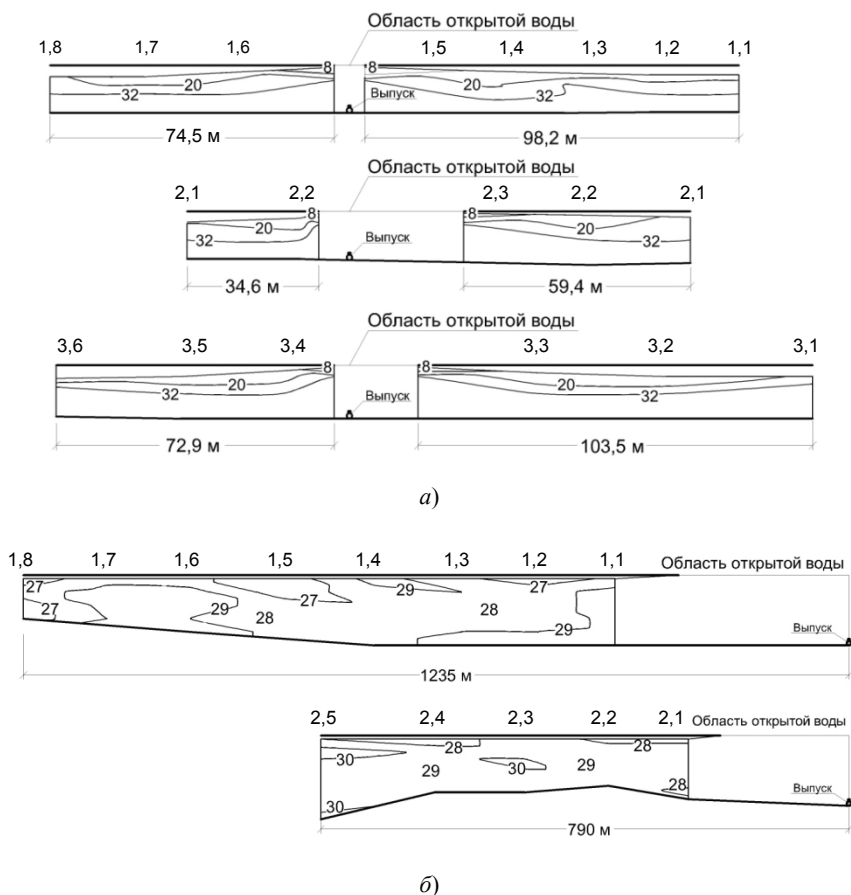
- сносящие течения в месте выпуска практически отсутствуют, распространение пятна загрязнений протекает равномерно в радиальном направлении;

- распространение сточных вод происходит в верхних (подледных) горизонтах воды практически без смешения с морской водой;

- температура сточной воды в месте выпуска не превышает 1 °С;

- незначительные изменения толщины льда и температуры сточной воды имеют ярко выраженное южное направление. Это объясняется, по-видимому, наличием свободной поверхности воды (майны) и северным господствующим направлением ветра холодного периода года.

Картина, формируемая глубоководным выпуском КОС «Центральные» (см. рис. 2, б), несколько отличается от полученной при исследовании выпуска КОС «Северные». В месте выпуска в ледовом поле зафиксирована



**Рис. 3.** Диаграммы солености морской воды в локальной области у глубоководных выпусков сточных КОС «Северные», северная часть Амурского залива, район полуострова Де Фриз (а) и «Центральные», Амурский залив, бухта Кирпичного Завода (б) (масштаб по вертикали 1:500; по горизонтали 1:1000)

обширная область открытой воды, имеющая форму эллипса, протянувшегося с северо-запада на юго-восток. Промоина расположена симметрично относительно оси выпуска, незначительно вытянута в юго-восточном направлении и имеет размеры 350×150 м. Максимальная температура моря в месте выпуска зафиксирована в верхних горизонтах воды на удалении 250 м от места выпуска и соста-вила 0,4 °С. Толщина льда увеличивалась от 0,2 м у границ открытой воды до 0,3...0,4 м на удалении 600...1300 м. Плотность морской воды по глубине в каждой точке отбора проб исследуемых створов, расположенных под поверхностью льда, незначительно отличалась от фоновой, то есть процесс смешения заканчивался в границах зоны открытой воды.

Действующие требования по обеспечению санитарной охраны прибрежных вод морей накладывают запрет на организацию береговых выпусков очищенных сточных вод [6]. Однако на практике встречаются примеры, когда сброс осуществляется во впадающие в моря маловодные ручьи, расход которых в зимний период практически полностью состоит из очищенных стоков.

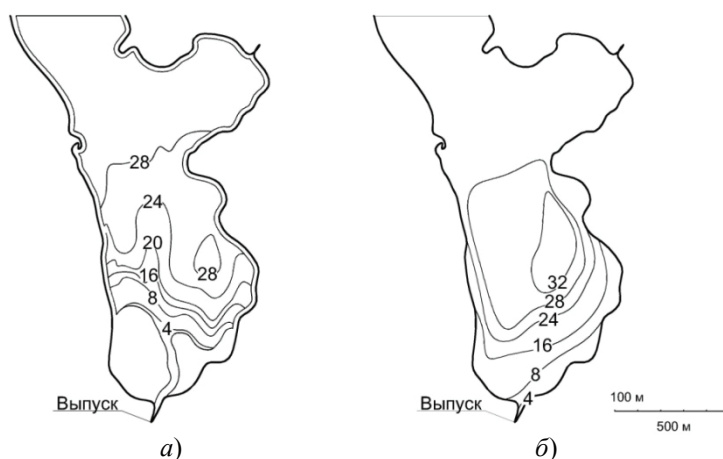
Примером такого типа выпусков может служить выпуск очистных сооружений кампуса Дальневосточного федерального университета (ДФУ), осуществляющих сброс очищенных стоков в ручей Безымянный, который впадает в куттовую часть бухты Новик (см. рис. 1, выпуск 3).

В периоды ледостава обширная область куттовой части бухты Новик полностью промерзает, толщина ледового поля по всей площади акватории меняется незначительно, возрастая от места выпуска. Температурных аномалий при отборе проб не фиксировалось, температура морских и сточных вод близка к 0 °С. Сбрасываемые сточные воды формируют русло, вдающееся в бухту на удаления до 250 м от места выпуска. Скорость потока сточных вод в месте сброса в период проведения исследований составляла около 1 см/с. Положение русла не постоянно и может изменяться в течение периода ледостава, о чем свидетельствуют многочисленные деформации и разрушения ледового поля в местах, где ранее проходило русло. Распространение сточных вод происходит узким клином, вдающимся в бухту на удаление 1000 м от места сброса, а также вдоль границ ледового поля и береговой линии. Влияние выпуска, определенное по изменению солености морской воды, фиксировалось на удаление до 1500 м от места выпуска.

На рисунке 3 приведены диаграммы солености воды куттовой части бухты Новик, полученные в периоды отрытой воды и ледостава.

Чтобы установить применимость официальных рекомендаций [4] для определения величин НДС в морских акваториях в периоды ледостава, в рамках предложенных исследований, выполнен расчет величины кратности общего разбавления, который сопоставили с результатами натурных исследований.

При расчете величин кратности разбавления в случае глубоководных выпусков 1 и 2 (см. рис. 1) скорость сносящих течений принималась близкой к нулю – 0,01 см/с. Отсутствие сносящих течений в местах глубоководных выпусков подтверждаются данными натурных исследований. В случае с КОС «Центральные» отбор проб проводился в штилевых условиях. Сведения о конструктивном решении глубоководных выпусков, а также расчетные расходы сточных вод установлены по данным табл. 1.



**Рис. 3. Диаграмма солености морской воды куттовой части бухты Новик в периоды ледостава (а) и открытой воды (б)**

При расчете кратности разбавления в случае берегового выпуска в бухте Новик источник загрязнения задавался в виде рассеивающего выпуска с большим числом оголовков, шаг оголовков принимался равным 0,2 м, глубина выпуска – 0,1 м. Длина рассеивающей части выпуска принималась равной ширине русла – 10 м. Скорость сносящего потока установлена по данным натурных исследований – 1 см/с. Плотности морской среды и очищенных стоков находились экспериментально, соответственно 1025 и 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Кратность общего разбавления, по данным натурных исследований, определялась для верхних горизонтов воды по зависимости

$$n = \frac{C_{\phi}}{C_{\phi} - C},$$

где  $C_{\phi}$ ,  $C$  – солености морской воды фоновая и в рассматриваемом створе, ‰, соответственно.

Расчетные и экспериментальные зависимости значений кратности общего разбавления  $n$  от расстояния от места выпуска  $x$  приведены на рис. 4. Во всех случаях для установления тенденций изменения величин общего разбавления на графики добавлены аппроксимирующие кривые с расчетной величиной достоверности  $R^2$ , полученные методом наименьших квадратов. В случае глубоководных выпусков дополнительно приведены расчетные значения начального разбавления.

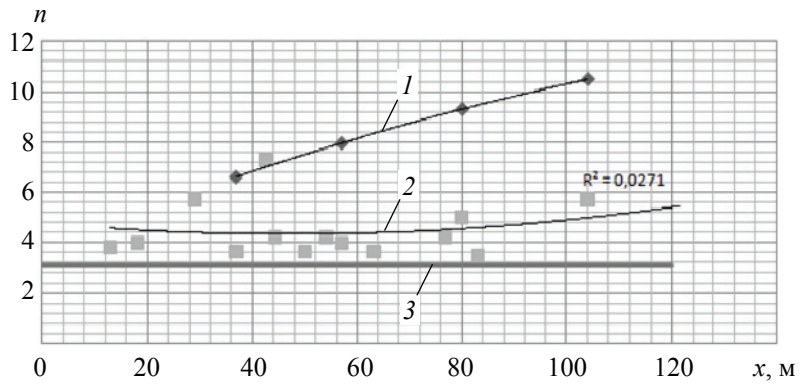
Данные по солености воды в конкретной точке акватории могут иметь большую дисперсию, зависящую, в частности, от характера морских течений [7]. Для оценки дисперсии и исключения сомнительных результатов поставлены параллельные эксперименты. Сомнительные результаты отсеивались по критерию Стьюдента.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений кратности разбавления сточных вод во всех случаях свидетельствует о том, что ожидаемые значение разбавления в той или иной степени превышают реальные.

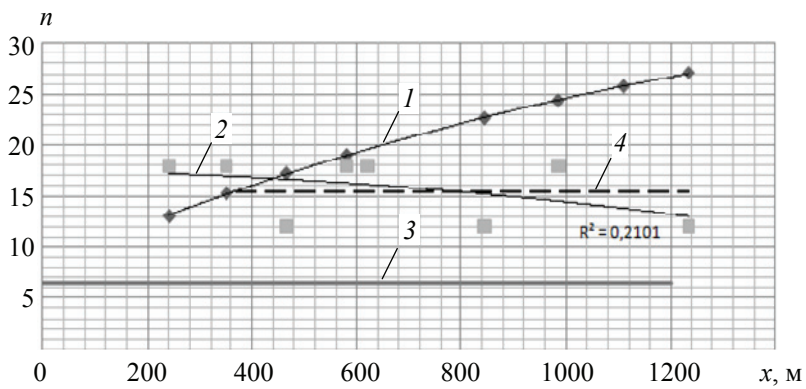
Анализ характеристик аппроксимирующих кривых, построенных по данным натурных исследований, позволяет сделать предположение о механизме распространения сточных вод в периоды ледостава. Так, близость графиков разбавления, построенных по натурным данным, к прямолинейной траектории (см. рис. 4, *а*, *б*) свидетельствует о фактическом отсутствии диффузионного перемешивания, то есть происходит вытеснение загрязняющих веществ новыми порциями сбрасываемых стоков. Причем, по данным натурных исследований, процесс вытеснения происходит в верхних (подледных) горизонтах воды.

Опираясь на сделанные предположения, становится возможным трактовать весьма неоднозначные результаты, полученные для выпуска КОС «Центральные» (см. рис. 4, *б*). Аппроксимирующая кривая, построенная по данным натурных исследований, имеет прогиб, свидетельствующий об уменьшении кратности разбавления с увеличением расстояния от места выпуска. Фактически, возникает ситуация, при которой концентрация загрязняющих веществ увеличивается по мере удаления от источника загрязнения, что физически противоестественно. Формирование указанной

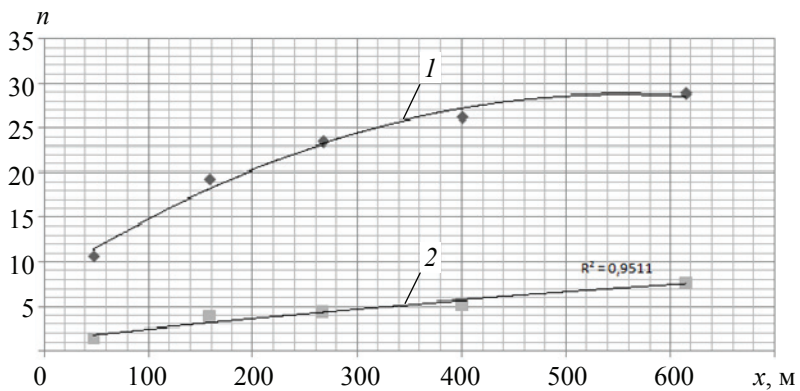
картины становится возможным только в том случае, если происходит вытеснение ранее сброшенных сточных вод новыми порциями стоков, качество которых изменяется во времени.



а)



б)



в)

**Рис. 4. Сопоставления результатов экспериментальных и расчетных значений величины основного разбавления очищенных сточных вод КОС «Северные» (а), «Центральные» (б) и «ДВФУ» в период ледостава (в):**

1 – расчетные значения; 2 – натурные данные; 3 – кратность начального разбавления по методике [4]; 4 – предполагаемое значение кратности общего разбавления при стационарном режиме сброса

В случае стационарного режима сброса КОС «Центральные», имеющего в месте выпуска обширную область открытой воды, разбавление струи сточных вод будет происходить по общим закономерностям [4] до границ «вода – лед», дальнейшее распространение – методом вытеснения.

На основании представленных результатов исследования сделан вывод, что официальная методика [4] дает существенную погрешность при расчете разбавления сточных вод в случае их выпуска в морские акватории в период ледостава, что может привести к недооценке экологической опасности. Учитывая это, а также тот факт, что в зимний период самоочищающая способность акваторий существенно снижается за счет понижения температуры, становится очевидной необходимость пересмотра официальных рекомендаций по расчету величин нормативно-допустимого сброса в морские акватории, покрытые льдом.

#### *Список литературы*

1. The Environmental Impact of Sewage and Wastewater Outfalls in Antarctica: An Example from Davis Station, East Antarctica / J. S. Stark [et al.] // *Water Research*. – 2016. – Vol. 105. – P. 602 – 614.
2. Final Supplemental Environmental Impact Statement for the U.S. Antarctic Program // National Science Foundation. – Washington, 1991. – 465 p.
3. Bleninger, T. *Coupled 3D Hydrodynamic Models for Submarine Outfalls: Environmental Hydraulic Design and Control of Multiport Diffusers* / T. Bleninger. – Karlsruhe, 2007. – 219 p.
4. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей : приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 17 декабря 2007 года № 333 (с изменениями на 31 июля 2018 года). – Текст : электронный // Министерство природных ресурсов РФ. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/902083726> (дата обращения: 03.02.2020).
5. Основы прогнозирования качества поверхностных вод / Л. Н. Фальковская [и др.]. – М. : Наука, 1982. – 181 с.
6. СанПиН 2.1.5.2582–10 Санитарно-эпидемиологические требования к охране прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения. – М. : Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 19 с.
7. Гидрологический режим бухты Новик (о. Русский) по результатам наблюдений 2013 – 2017 гг. / А. Ю. Лазарюк, С. П. Захарков, Е. Н. Марьина [и др.] // *Материалы докл. десятого Всероссийского симпозиума «Физика геосфер»*, 23 – 29 октября 2017 г., Владивосток. – Владивосток, 2017. – С. 66 – 70.

#### *References*

1. Stark J.S., Corbett P.A., Dunshea G., Johnstone G., King C., Mondon J.A., Powerd M.L., Samuel A., Snape I., Riddle M. The Environmental Impact of Sewage and Wastewater Outfalls in Antarctica: An Example from Davis Station, East Antarctica, *Water Research*, 2016, vol. 105, pp. 602-614.
2. *Final Supplemental Environmental Impact Statement for the U.S. Antarctic Program*, National Science Foundation, Washington, 1991, 465 p.
3. Bleninger T. *Coupled 3D Hydrodynamic Models for Submarine Outfalls: Environmental Hydraulic Design and Control of Multiport Diffusers*, Karlsruhe, 2007, 219 p.

4. <http://docs.cntd.ru/document/902083726> (accessed 03 February 2020).

5. Fal'kovskaya L.N., Kaminskiy V.S., Paal' L.L., Gribovskaya I.F. *Osnovy prognozirovaniya kachestva poverkhnostnykh vod* [Basics of surface water quality forecasting], Moscow: Nauka, 1982, 181 p. (In Russ.)

6. SanPiN 2.1.5.2582–10 *Sanitarno-epidemiologicheskiye trebovaniya k okhrane pribrezhnykh vod morey ot zagryazneniya v mestakh vodopol'zovaniya naseleniya* [SanPiN 2.1.5.2582-10 Sanitary and epidemiological requirements for the protection of coastal waters of the seas from pollution in places of water use of the population], Moscow: Federal'nyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2010, 19 p. (In Russ.)

7. Lazaryuk A.Yu., Zakharkov S.P., Mar'ina Ye.N., Mel'nichenko N.A., Tyuvev A.V. *Materialy dokladov desyatogo Vserossiyskogo simpoziuma «Fizika geosfer»* [Materials of reports of the tenth All-Russian Symposium “Physics of the Geospheres”], 23 - 29 October, 2017, Vladivostok, 2017, pp. 66-70. (In Russ.)

---

### **On the effect of Ice Cover on Dilution of Treated Wastewater when Discharged into Offshore Areas**

**S. A. Bezborodov**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Keywords:** wastewater discharge; ice cover; marine areas.

**Abstract:** The results of field studies of coastal and deep-water discharge of treated wastewater in the bays of the Amur Bay and island Russian. The obtained data from field studies were compared with calculations performed according to the current regulatory methods that assess environmental safety by the degree of dilution of wastewater by the sea. The results showed that the real decrease in pollutant concentrations was significantly lower than the calculated values.

---

© С. А. Безбородов, 2020