

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В РУСЛЕ РЕКИ НЕВЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗМОЖНОЙ АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ПОЛИГОНЕ ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ КРАСНЫЙ БОР¹

© 2022 г. С. А. Кондратьев^а, *, М. В. Шмакова^а

^аИнститут озероведения РАН – обособленное структурное подразделение
Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН,
Санкт-Петербург, 196105 Россия

*e-mail: 3718470@gmail.com

Поступила в редакцию 22.11.2021 г.

После доработки 02.02.2022 г.

Принята к публикации 29.03.2022 г.

Один из потенциальных источников загрязнения р. Невы и Финского залива Балтийского моря – полигон хранения промышленных отходов I–V классов опасности Красный Бор, расположенный на левобережной части водосбора Невы. При аварийной ситуации на полигоне токсичные стоки могут попасть в реку через гидрографическую сеть притоков, впадающих в основное русло выше водозаборов Санкт-Петербурга. С использованием методов математического моделирования выполнен расчет возможного распространения токсичных веществ в гидрографической сети водосбора, а затем в русле Невы до ближайшего водозабора Санкт-Петербурга и далее до Невской губы Финского залива при разных сценариях развития аварийной ситуации на полигоне и при разной водности. Представлены рассчитанные значения степени разбавления примеси в условиях разной водности при движении сброшенных сточных вод через водосборы рек Ижоры и Тосны. Показано, что имеется определенный запас времени (15–25 ч) для принятия необходимых мер по защите ближайшего водозабора Санкт-Петербурга или перехвату сброшенных стоков в гидрографической сети. Дана оценка особенностей распространения взвешенных частиц в направлении водозаборов.

Ключевые слова: водосбор, полигон токсичных отходов, примесь, моделирование, гидрография, загрязнение, река.

DOI: 10.31857/S0321059622060074

ВВЕДЕНИЕ

Один из потенциальных источников загрязнения р. Невы и Невской губы Финского залива Балтийского моря – полигон хранения высоко-токсичных отходов I–V классов опасности “Красный Бор”, расположенный в 30 км от Санкт-Петербурга на водоразделе водосборов рек Тосны и Ижоры – левобережных притоков Невы. Устья Ижоры и Тосны находятся соответственно в 7 и 17 км выше ближайшего водозабора Санкт-Петербурга. Полигон – единственное предприятие для захоронения опасных производственных отходов на территории Северо-Западного федерального округа. На полигоне находится ~2 млн т токсичных отходов, которые свозились сюда с

1969 г. с территории всей России и Прибалтики [2, 4, 7, 9, 12].

Вопросы, связанные с изучением, количественной оценкой и прогнозом последствий возможных аварийных ситуаций на полигоне, ранее неоднократно поднимались на различном уровне. С использованием методов математического моделирования оценивались последствия гипотетических сбросов с полигона в гидрографическую сеть р. Ижоры и затем в русло Невы [3, 11]. Водосбор р. Тосны как потенциальный путь распространения аварийного сброса не рассматривался. Кроме того, ставилась задача описания переноса примеси непосредственно в русло Невы. На начальных этапах исследований считалось, что разбавление вод притоков происходит равномерно по сечению русла Невы, хотя из гидродинамических соображений в правомочности этого предположения можно усомниться.

¹ Работа выполнена за счет средств федерального бюджета в рамках темы № 0154-2019-0001 “Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоемов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов”.



Рис. 1. Схема расположения открытых котлованов полигона «Красный Бор». Числа на рисунке – номера карт полигона.

Цель настоящего исследования – модельная оценка переноса примесей от возможного аварийного сброса через гидрографические сети рек Ижоры и Тосны в направлении водозаборов Санкт-Петербурга, расположенных на р. Неве, и далее до Невской губы Финского залива.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полигон «Красный Бор» создан в 1967 г. как временный объект (временная свалка). Продолжительность эксплуатации опытного полигона определена проектным заданием в три года. Однако в связи с отсутствием альтернативного предприятия полигон активно эксплуатировался до 2015 г. [7]. В настоящее время большинство карт-котлованов полигона «Красный Бор» рекультивированы, засыпаны глиной, покрыты плодородным почвенным слоем и засеяны травой. На территории полигона осталось 5 открытых котлованов: 59, 64, 66, 67 и 68. Причем, котлованы 64 и 68 укрыты плавучими понтонами, с которых откачиваются атмосферные осадки, что исключает возможность перелива и разрушения обваловки карт в результате интенсивных ливней и снеготая-

ния. Расположение котлованов представлено на рис. 1, их основные параметры содержатся в табл. 1.

Как отмечено в работе [7], фактические объемы карт-котлованов значительно превышают проектные, поскольку котлованы обвалованы дамбами для увеличения их емкости. Вокруг котлованов высота обваловки составляет до 5 м. В [7] отмечено, что обваловка котлованов выполнена с нарушениями нормативов – не убран прослой песков, залегающий непосредственно над кембрийскими глинами и водонепроницаемыми моренными отложениями. Эти пески могут служить коллекторами для перетока загрязненного фильтра между закрытыми картами, а также способствовать выносу содержимого за их пределы [12]. В рамках настоящего исследования рассматриваются последствия возникновения вполне возможных аварийных ситуаций на открытых котлованах 59, 66 и 67, а также чисто гипотетические сценарии, связанные с разрушением остальных карт-котлованов полигона.

Сотрудники Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) провели детальные полевые исследования гидрографической сети водосборов Ижоры и Тосны, на которых расположен полигон [2, 8]. В пределах

Таблица 1. Параметры открытых котлованов полигона «Красный Бор»

№ карты	Год открытия	Объем карты, м ³	Глубина карты, м
59	1986	8112	8.5
64	1988	445 360	24.0
66	1990	10 725	6.5
67	1991	32 400	9.0
68	1992	106 360	10.0

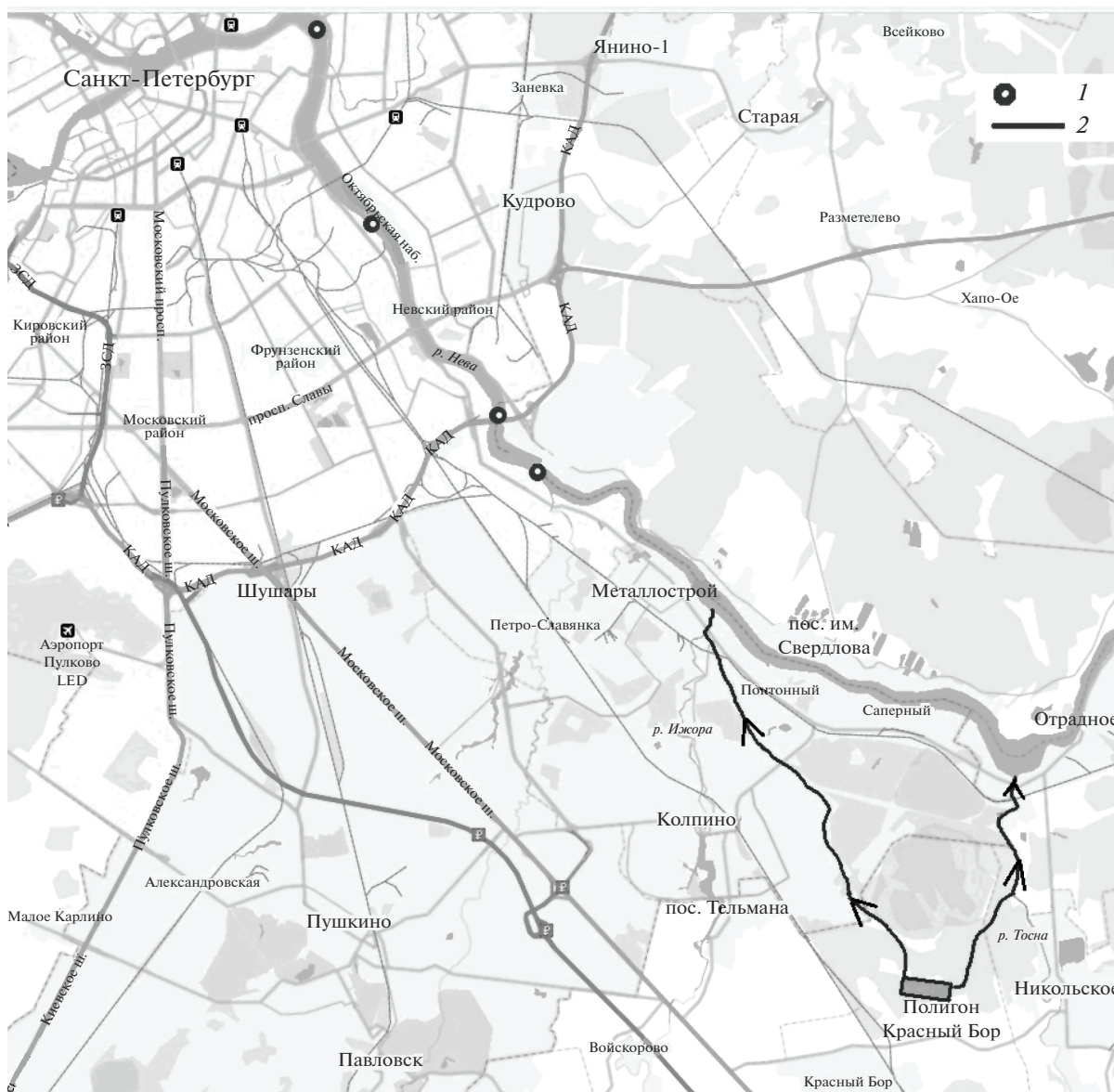


Рис. 2. Картограмма расположения полигона «Красный Бор»: 1 – пункты водозабора Санкт-Петербурга, 2 – маршруты распространения возможного аварийного сброса до русла Невы.

района возможного распространения аварийного сброса определены пути его распространения (рис. 2) как через водосбор Ижоры, так и через водосбор Тосны.

Для перехвата поверхностного и грунтового стока по внешнему контуру полигона устроен кольцевой канал, имеющий глубину 2.5–3.5 м. Выпуск канала оборудован шлюзовой системой с запорным устройством. Кольцевой канал соединен с магистральным отводным каналом. Далее сток с полигона до русла Невы осуществляется по руч. Большой Ижорец, рекам Большой Ижорке и Ижоре. Альтернативный путь распространения аварийного сброса – гидрографическая сеть во-

досбора р. Тосны. Это ручей без названия, образующийся в 150 м к С от границ полигона, руч. Хованов и сама Тосна. Характеристики перечисленных водотоков, полученные по данным полевого обследования, приведены в табл. 2.

Сравнивая два возможных пути распространения загрязняющих веществ от аварийного сброса с полигона Красный Бор, можно отметить, что протяженность траектории через водосбор Ижоры на 3.45 км короче, чем через водосбор Тосны.

В [8] сотрудники РГГМУ провели анализ современной инфраструктуры полигона и определили возможные причины возникновения ава-

Таблица 2. Характеристики участков трассы возможного распространения аварийного сброса

Водоток	Длина, км	Средняя ширина, м	Средний уклон, ‰	Расход, м ³ /с		
				50%	75%	97%
Магистральный канал	2.63	0.50	1.7	0.063	0.049	0.028
руч. Большой Ижорец	8.24	1–3	1.3	0.088	0.069	0.039
р. Большая Ижорка.	3.13	2–5	0.3	0.297	0.231	0.131
р. Ижора	0.64	20–50	0.2	10.1	8.64	5.24
руч. без названия	2.08	0.50	2.6	0.007	0.0056	0.0034
руч. Хованов	1.72	1.5	4.3	0.054	0.041	0.023
р. Тосна	4.16	90	0.2	11.3	8.75	4.66

рийной ситуации, связанной с попаданием токсичных веществ в гидрографическую сеть водосбора. Для выполнения последующих расчетов на основе полученных материалов использовались описанные ниже четыре сценария.

Сценарий 1. Перелив содержимого котлованов 59, 66 и 67 через верхнюю кромку обваловки вследствие интенсивных осадков или снеготаяния. Превышение уровня содержимого над обваловкой – 0.10 м. Суммарный сброс – 620 м³ за 96 ч.

Сценарий 2. Разрушение обваловки котлованов 59, 66 и 67 на 1 м вследствие интенсивных осадков или снеготаяния в весенний период. Суммарный сброс – 6824 м³ за 96 ч.

Сценарий 3. Разрушение обваловки котлованов 59, 64, 66, 67 и 68, вплоть до полного – до уровня поверхности почвы, вследствие возникновения чрезвычайной ситуации (теракт, взрыв, цунами и пр.). Суммарный сброс – 176985 м³ за 96 ч.

Сценарий 4. Подземная фильтрация токсикантов из котлованов вследствие возможной фильтрации содержимого при возникновении тектонических разломов в массивах кембрийских глин с последующим попаданием в гидрографическую сеть (тектонические нарушения магнитудой до 4.0 баллов зафиксированы в районе Санкт-Петербурга). Источники риска – котлованы 59, 64, 66–68, а также законсервированные карты-хранилища отходов. Объем токсикантов, попадающих во внешнюю среду, – до 50000 м³ за 12 ч.

МЕТОД РАСЧЕТА

Расчеты распространения загрязняющего вещества в гидрографической сети водосбора до основного русла р. Невы проводились по системе уравнений Сен-Венана в одномерной постановке [1, 13, 14, 16, 21, 22], дополненной моделью распространения растворенных примесей, основанной на уравнении турбулентной диффузии [6].

Моделирование распространения загрязняющего вещества в русле Невы выполнялось с использованием алгоритма расчета двухфазного массопереноса, который позволяет оценить скорость и характер распространения как растворенных, так и взвешенных частиц – адсорбентов загрязняющих веществ, поступающих со стоком рек Ижоры и Тосны. В отечественной и зарубежной литературе [5, 10, 15, 17–22] достаточно часто встречается дополнение системы уравнений Сен-Венана балансowymi соотношениями для описания транспорта наносов и русловых деформаций, где изменение отметок дна в весовых единицах измерения приравнивается массе осевшего вещества с учетом гидравлической крупности частиц. При решении настоящей задачи перенос загрязненных вод рек Ижоры и Тосны в русле Невы рассчитывался по модели движения воды и твердого вещества в трехмерной постановке [3, 14], основанной на математическом представлении сил, действующих в системе водный поток – донные отложения – наносы, также дополненной диффузионным уравнением распространения растворенных примесей [6]. Основная особенность данной модели – учет сил, действующих

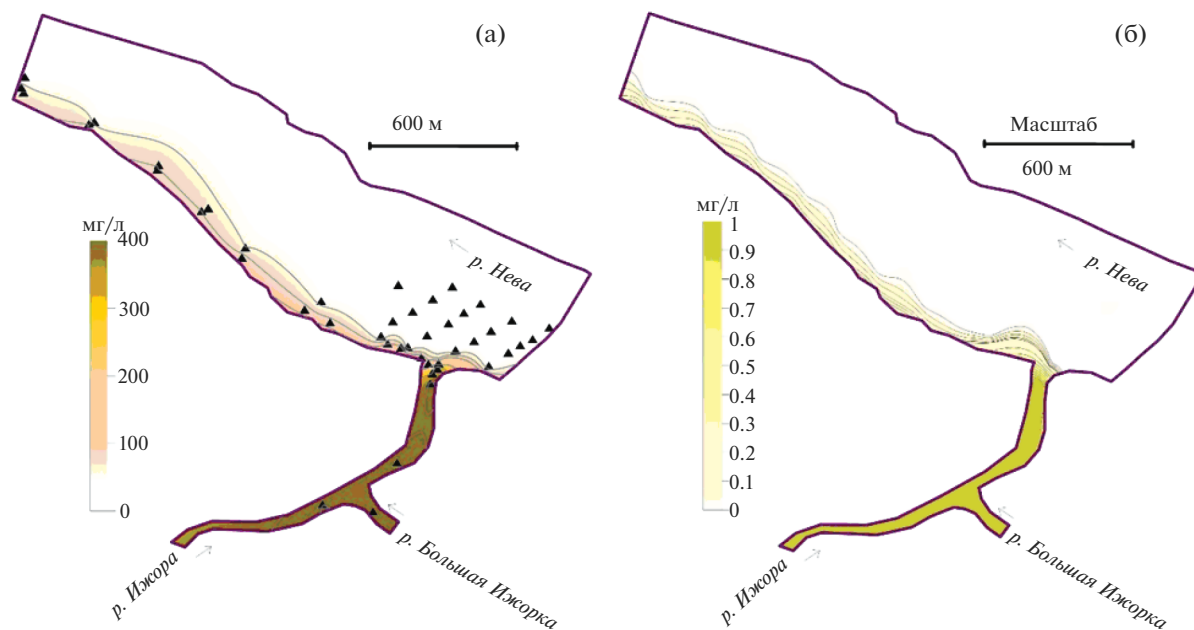


Рис. 3. Результаты натурального эксперимента по оценке общей минерализации в зоне смешения вод рек Ижоры и Невы 14.07.2019 (черные треугольники – точки измерений) (а); результаты моделирования распространения примеси, поступившей в Неву со стоком Ижоры (б) [3, 18].

щих на движущиеся частицы наносов со стороны не пограничного слоя жидкости, а донных отложений с учетом их хорошо изученных в грунтоведении свойств; т. е. реализуется взаимосвязанный расчет с учетом взаимовлияния потока и наносов. Уравнения движения воды и твердого вещества дополнены уравнениями неразрывности и баланса кинетической энергии потока и частиц. Результатами расчета были время распространения сброшенного загрязняющего вещества до любой точки траектории и его концентрация в этой точке.

На основе анализа результатов проведенного в 2019 г. натурального эксперимента (рис. 3а) удалось показать, что воды р. Ижоры после поступления в русло Невы прижимаются основным течением реки к берегу и распространяются вдоль него в направлении течения. Влияние поперечной турбулентной диффузии на перемешивание водных масс крайне незначительно [3, 18]. На рис. 3б представлены результаты расчетов распространения примеси, поступившей в основное русло со стоком Ижоры, при средней многолетней величине расхода воды в Неве $2500 \text{ м}^3/\text{с}$. Сравнение результатов моделирования и натурального экспери-

Таблица 3. Значения коэффициента скорости распада K и коэффициента неконсервативности K_n

Вещество	Скорость распада K , 1/сут, при $T < 10^\circ\text{C}$	Коэффициент неконсервативности K_n , 1/с
Нефтепродукты	0.02	$-2.32\text{E}-07$
СПАВ	0.3	$-3.48\text{E}-6$
Аммонийный азот	0.9	$-1.044\text{E}-05$
БПК	0.2	$-2.32\text{E}-06$
Фенолы	0.2	$-2.32\text{E}-06$
ХПК	0.1	$-1.16\text{E}-06$

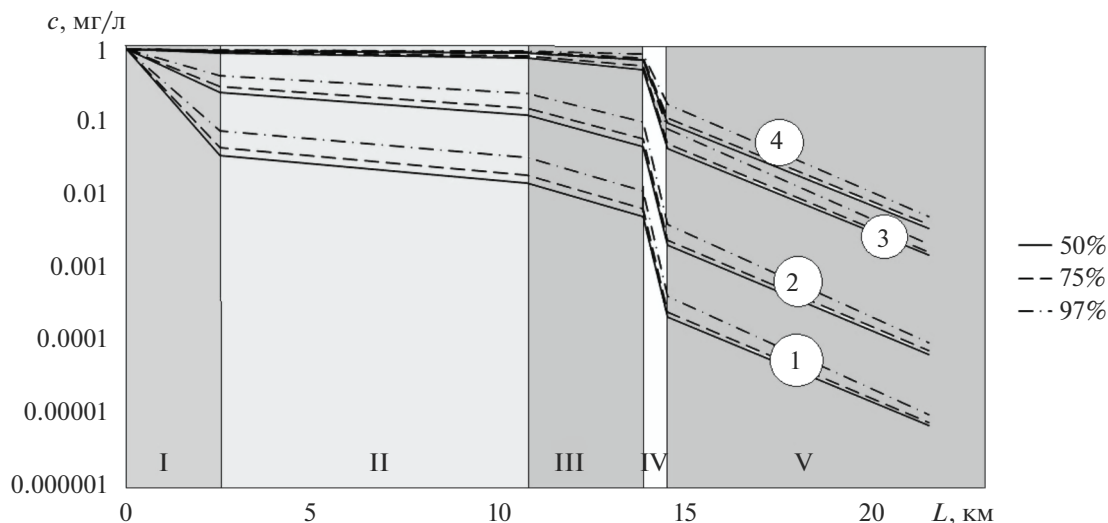


Рис. 4. Результаты расчетов снижения значения начальной единичной концентрации c загрязняющих веществ при аварийном сбросе на участках трассы их возможного распространения по сценариям 1, 2, 3 и 4 до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97%-й обеспеченности и движении сточных вод через водосбор р. Ижоры: I – магистральный канал, II – руч. Большой Ижорец, III – р. Большая Ижорка, IV – р. Ижора, V – р. Нева.

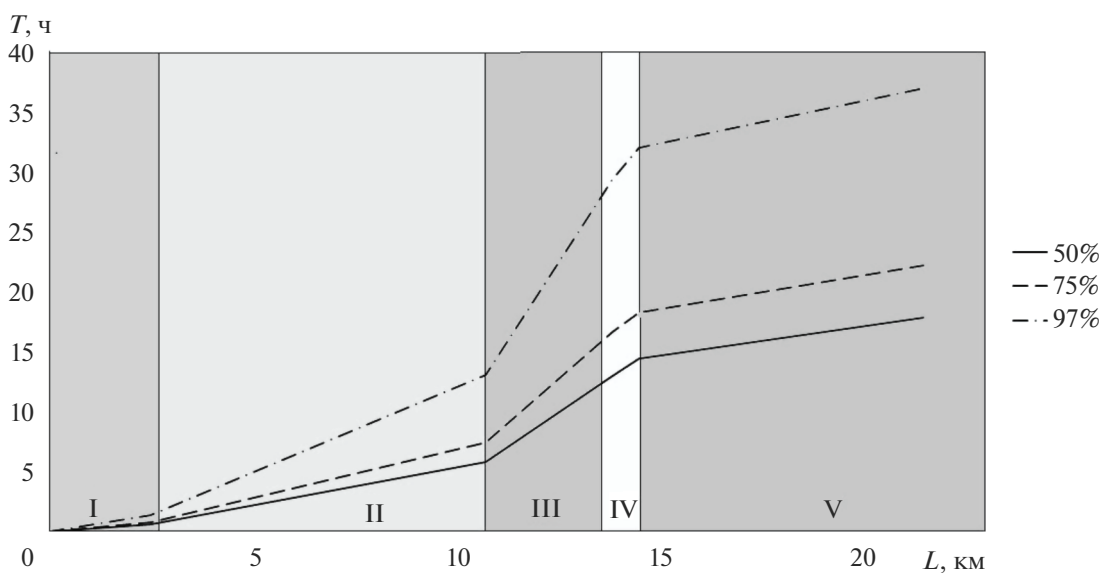


Рис. 5. Результаты расчетов времени T добегания сточных вод в результате аварийного их сброса до водозабора СВС через водосбор р. Ижоры при водности 50, 75 и 97%-й обеспеченности: I – магистральный канал, II – руч. Большой Ижорец, III – р. Большая Ижорка, IV – р. Ижора, V – р. Нева.

мента подтверждает адекватность модели изучаемым процессам и показывает, что основной перенос примеси в русле Невы, поступившей с водосбора, приходится на вдольбереговую зону шириной 30–35 м. По стрежню Невы движется вода, поступившая из Ладожского озера и практически не подверженная влиянию загрязненных притоков.

Расчеты выполнялись для единичной концентрации транспортируемого консервативного загрязняющего вещества. Это позволяет без труда пересчитать полученные результаты моделирования на нужную концентрацию сброса. Неконсервативность загрязняющего вещества может быть учтена введением в модель турбулентной диффузии [6] экспоненциальной зависимости для оценки

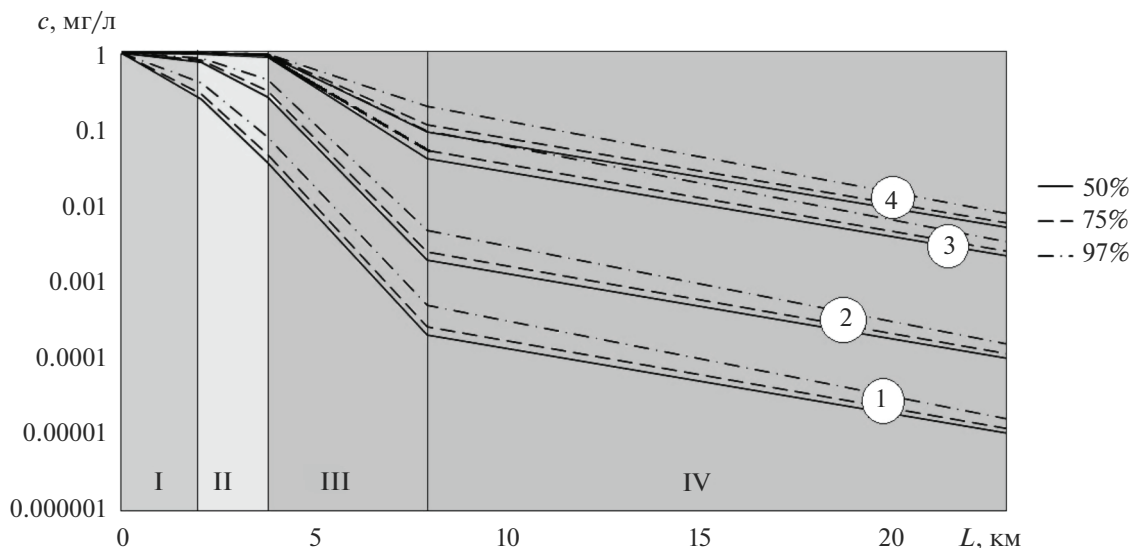


Рис. 6. Результаты расчетов снижения значения начальной единичной концентрации c загрязняющих веществ при аварийном сбросе на участках трассы их возможного распространения по сценариям 1, 2, 3 и 4 до водозабора СВС при водности 50, 75 и 97%-й обеспеченности и движении сточных вод через водосбор р. Тосны: I – ручей без названия, II – руч. Хованов, III – р. Тосна, IV – р. Нева.

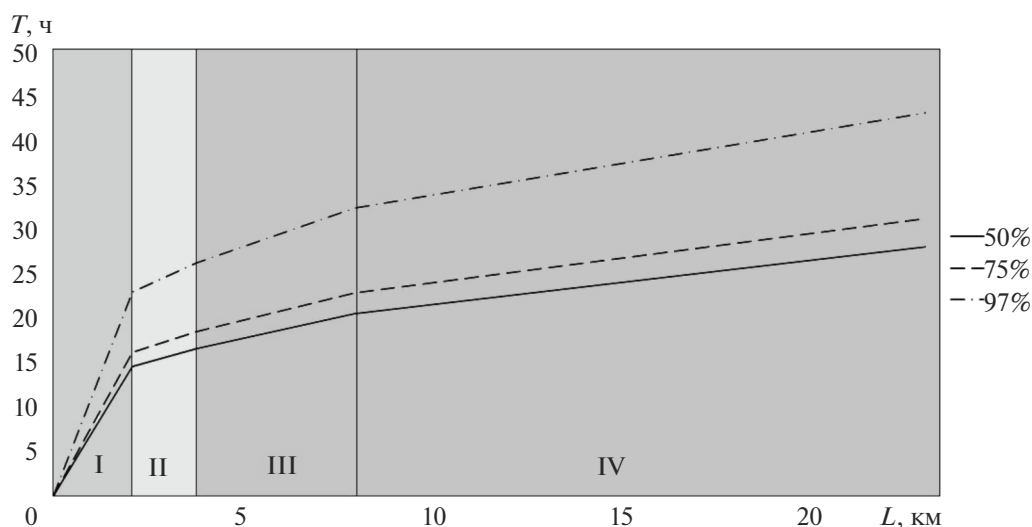


Рис. 7. Результаты расчетов времени T добегания сточных вод в результате аварийного их сброса до водозабора СВС через водосбор р. Тосны при водности 50, 75 и 97%-й обеспеченности: I – ручей без названия, II – руч. Хованов, III – р. Тосна, IV – р. Нева.

редукции концентрации вещества вида $\exp(K_n x/v)$ (x , м – продольная ордината; v , м/с – скорость). При этом коэффициент неконсервативности K_n (1/с) связан со скоростью распада (превращения) K (1/сут) следующим соотношением: $K_n = -1.16 \times 10^{-5} K$. Значения коэффициента скорости распада K и коэффициента неконсервативности K_n для некоторых токсикантов представлены в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 и 5 приведены рассчитанные концентрации загрязняющего вещества (в долях единичной концентрации) в стоке и время продвижения сброшенных сточных вод в направлении ближайшего городского водозабора Северной водопроводной станции (СВС), рассчитанные для

Таблица 4. Концентрации некоторых загрязняющих веществ (мг/л) в аварийном сбросе с полигона (1), в потоке после прохождения магистрального канала (2), руч. Большой Ижорец (3), р. Большая Ижора (4), р. Ижоры (5), в створах водозаборов Санкт-Петербурга (6–9) и при впадении Невы в Невскую губу (10) в условиях средней водности (жирный шрифт – превышение ПДК)

Вещество/ сценарий сброса	Нефтепродукты (ПДК = 0.05 мг/л)				Кадмий (ПДК = 0.005 мг/л)				Ртуть (ПДК = 0.00001 мг/л)			
	сценарий 1	сценарий 2	сценарий 3	сценарий 4	сценарий 1	сценарий 2	сценарий 3	сценарий 4	сценарий 1	сценарий 2	сценарий 3	сценарий 4
1	46.5	46.5	46.5	46.5	0.375	0.375	0.375	0.375	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068
2	1.64	12.04	41.20	44.10	0.0132	0.0971	0.3323	0.3556	0.0002	0.0018	0.0060	0.0064
3	0.70	5.91	35.55	41.13	0.0056	0.0477	0.2867	0.3317	1.02E-04	0.00086	0.0052	0.0060
4	0.24	2.18	24.29	33.52	0.0019	0.0176	0.1959	0.2704	3.47E-05	0.00032	0.0036	0.0049
5	0.0101	0.0970	2.064	4.598	8.18E-05	7.82E-04	0.0166	0.0371	1.48E-06	1.42E-05	3.02E-04	6.72E-04
6	3.32E-04	0.0032	0.0707	0.167	2.68E-06	2.56E-05	5.70E-04	0.0013	4.86E-08	4.65E-07	1.03E-05	2.44E-05
7	3.18E-04	0.0030	0.0675	0.159	2.56E-06	2.45E-05	5.45E-04	0.0013	4.64E-08	4.44E-07	9.88E-06	2.33E-05
8	2.95E-04	0.0028	0.0629	0.148	2.38E-06	2.28E-05	5.07E-04	0.0012	4.32E-08	4.13E-07	9.19E-06	2.17E-05
9	2.76E-04	0.0026	0.0588	0.139	2.23E-06	2.13E-05	4.74E-04	0.0011	4.04E-08	3.86E-07	8.60E-06	2.03E-05
10	2.59E-04	0.0025	0.0552	0.130	2.09E-06	2.00E-05	4.45E-04	0.0011	3.79E-08	3.63E-07	8.07E-06	1.90E-05

магистрального канала, руч. Большой Ижорец, рек Большая Ижорка, Ижоры и Невы при расходах воды разной обеспеченности в соответствии с приведенными выше сценариями аварийного сброса. На рис. 6 и 7 показаны те же характеристики движения загрязняющих веществ по водной системе, состоящей из ручья без названия в восточной части полигона, руч. Хованов, рек Тосны и Невы.

Результаты расчетов показали, что наиболее неблагоприятная ситуация с разбавлением сброшенных сточных вод наблюдается при реализации четвертого сценария аварийного сброса с полигона, возможного при тектонических разломах в массивах кембрийских глин. При этом, как и по всем другим сценариям, увеличение водности положительно влияет на степень разбавления. По гидрографической сети р. Ижоры в условиях средней водности (обеспеченности 50%) сброс достигнет Невы через 14.3 ч, а ближайшего водозабора – через 17.8 ч. Снижение водности приводит к существенному увеличению времени добега. Так, для обеспеченности стока 75 и 97% время достижения сброса водозабора СВС увеличится соответственно до 22.1 и 36.9 ч. Для р. Тосны при средней водности время достижения сброшенными водами русла Невы составляет 24 ч, а с учетом транспорта в Неве загрязняющие вещества могут оказаться в створе СВС через 28.8 ч. При этом рассчитанные итоговые концентрации примеси в районе водозабора при движении сброшенных вод как через водосбор Ижоры, так и через водосбор Тосны различаются между собой несущественно.

Время достижения загрязняющими веществами последующих городских водозаборов (рис. 1) через гидрографическую сеть Ижоры в условиях средней водности составит соответственно 19.3, 23.3 и 27.3 ч. Загрязняющие вещества достигнут Невской губы Финского залива через 31.6 ч. Для гидрографической сети Тосны указанные интервалы времени достижения последующих контрольных точек будут составлять 30.3, 34.3, 38.3 и 43.6 ч.

Для понимания опасности последствий возможной аварийной ситуации, связанной с поступлением сточных вод полигона в речную сеть, в табл. 4 приведены примеры пересчета единичной концентрации в реальную по загрязняющим веществам – нефтепродуктам, кадмию и ртути. Расчеты выполнялись для четырех рассмотренных выше сценариев аварийного сброса через водосбор р. Ижоры в условиях средней водности. Содержание нефтепродуктов в сточных водах с полигона уменьшается до значений ниже ПДК

для рыбохозяйственного водопользования в устье Ижоры при реализации сценария 1 сброса и к моменту достижения ближайшего водозабора СВС при сценарии 2. Катастрофические сценарии (3 и 4) могут привести к превышению ПДК по нефтепродуктам во вдольбереговой области распространения вод притоков вплоть до Невской губы. Концентрация кадмия снижается до ПДК уже в устье Большой Ижорки при сценарии 1 сброса и не будет превышать ПДК в створе СВС при всех остальных рассмотренных сценариях. Ртуть разбавляется до ПДК при сценарии 1 сброса в Ижоре, при сценарии 2 – в створе СВС и при сценарии 3 – в створе следующего водозабора. В случае реализации сценария 4 сброса концентрация ртути не снизится до значения ПДК на протяжении всей рассматриваемой вдольбереговой зоны.

Приведенный пример – свидетельство того, что количественная оценка показателей процесса снижения концентраций загрязняющих веществ по мере их продвижения к водозаборах Санкт-Петербурга для каждого вещества зависит от сценария аварийной ситуации и значения ПДК. Негативное воздействие по первым двум сценариям, которые вполне реальны в настоящее время, может быть несущественным для муниципальных водозаборов за счет процессов разбавления в гидрографической сети, т. е. концентрации примеси в невоской воде в контрольных точках не превысят ПДК. В то же время гипотетические катастрофические сценарии (3 и 4) в ряде случаев могут привести к возникновению серьезных проблем с качеством воды в муниципальных водозаборах.

Кроме распространения растворенной примеси, для русла Невы выполнялся расчет транспорта поступивших со стоком рек Ижоры и Тосны взвешенных частиц – потенциальных носителей сорбированных на них токсикантов. Результаты расчетов показали, что все взвешенные частицы средней крупности (0.05 мм), поступившие в русло со стоком рек Ижоры и Тосны, оседают в прибрежной зоне на расстоянии ≤ 0.5 км от места впадения притока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием методов математического моделирования выполнен расчет распространения загрязняющих веществ в гидрографической сети водосбора, а затем в русле Невы при четырех различных сценариях развития аварийной ситуации на полигоне хранения промышленных отходов классов I–V опасности “Красный Бор”. Если сравнивать продвижение сброшенных загрязняющих веществ от полигона до ближайшего водо-

забора Санкт-Петербурга по маршрутам Полигон–Ижора–Нева и Полигон–Тосна–Нева, то можно отметить, что протяженность траектории через водосбор Ижоры на 3.45 км короче, чем через водосбор Тосны. Соответственно, время добегания сточных вод (при водности 50%-й обеспеченности) составит 17.8 ч через гидрографическую сеть Ижоры, и 28.8 ч через гидрографическую сеть Тосны. До Невской губы Финского залива сброшенные воды дойдут через Ижору через 31.6 ч, через Тосну через 42.6 ч.

Результаты количественной оценки концентраций загрязняющих веществ по мере их продвижения к водозаборах Санкт-Петербурга для каждого вещества существенно зависят от сценария возникновения аварийной ситуации и значения ПДК. Негативное воздействие по первым двум сценариям, реализация которых вполне реальна в настоящее время, может быть несущественным для водозаборов за счет процессов разбавления сточных вод в гидрографической сети водосбора, т. е. концентрации загрязняющих веществ в невиской воде в контрольных точках не превысят ПДК. В то же время ситуации по гипотетическим катастрофическим сценариям в ряде случаев могут привести к серьезным проблемам с качеством воды в муниципальных водозаборах.

Взвешенные частицы средней крупностью 0.05 мм, попадающие в русло Невы со стоком притоков, не представляют непосредственной угрозы для водозаборов, так как до них не доходят и аккумулируются в прибрежной части русла.

Имеется определенный запас времени (15–25 ч в зависимости от водности) для принятия необходимых мер по защите ближайшего водозабора или по перехвату сброшенных стоков в гидрографической сети. Поступление растворенной примеси в конкретный водозабор будет определяться его конструкцией и расположением в акватории. Чтобы избежать попадания загрязняющих веществ в водозаборы, следует размещать их за пределами зоны вдольберегового распространения вод притоков. Более детальная оценка поступления растворенной примеси в имеющиеся водозаборы “Водоканала Санкт-Петербурга” может быть сделана после уточнения их расположения по ширине и глубине русла Невы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грушевский М.С.* Неустановившееся движение воды в реках и каналах. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 288 с.
2. *Илларионов А.В., Лебедева А.А., Шилов Д.В.* Разработка комплексной программы системы наблюдений за состоянием окружающей среды вблизи полигона токсичных отходов “Красный Бор” // Уч. зап. РГГМУ. 2011. Вып. 22. С. 211–220.
3. *Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Игнатъева Н.В., Иванова Е.В., Гузиватый В.В.* Экспериментальные и модельные исследования распространения вод реки Ижоры в русле реки Невы // *Фундаментал. приклад. гидрофизика*. 2020. Т. 13. № 3. С. 83–92.
4. *Марова А.В.* Методы обеспечения экологической безопасности полигона Красный Бор на основе рискологического подхода. Автореф. дис. ... канд. географ. наук СПб.: РГГМУ, 2011. 27 с.
5. *Медников Е.П.* К теории взвешенных наносов // *Метеорология и гидрология*. 1985. № 9. С. 82–94.
6. *Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод.* Л.: Гидрометеиздат, 1987. 288 с.
7. *Объект накопленного экологического вреда полигон токсичных отходов “Красный Бор”. Докл. ЭПЦ “БЕЛЛОНА”.* СПб.: АНО содействия охране окружающей среды “Экспертно-правовой центр “ЭкоПраво”, 2020. 87 с.
8. *Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС) СПб ГУПП “Полигона “Красный Бор”.* Раздел 6. Оценка воздействия на водные ресурсы. СПб.: Пеуру Рус, 2015. С. 19–27.
9. *Питулько В.М., Кулибаба В.В.* Концепция технического решения ликвидации угрозы прорыва жидких отходов из карт полигона Красный Бор и направления последующей его рекультивации // *Регион. экология*. 2016. № 2 (44). С. 43–51.
10. *Потапов И.И., Снигур К.С.* Моделирование эволюции песчано-гравийного дна канала в одномерном приближении // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2015 Т. 7. № 2. С. 315–328.
11. *Румянцев В.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Рыбакин В.Н., Крючков А.М., Моисеенков А.И., Шмакова М.В., Ершова А.А.* Экспериментальные исследования и моделирование формирования качества воды в реке Нева // *Изв. РГО*. 2010. Т. 142 (2). С. 24–31.
12. *Сольский С.В., Герасимова Е.В., Дубровская Н.В., Козлова А.В., Климовский С.Г.* Практика рекультивации полигона промышленных токсичных отходов ГУПП “Полигон “Красный бор” // *Изв. ВНИИГ*. 2009. Т. 253. С. 62–72.
13. *Стокер Дж.* Волны на воде. Математическая теория и приложения. М.: Изд-во иностр. лит., 1959. 617 с.
14. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб.: Лема, 2013. 142 с.
15. *Cao Z., Day R., Egashira S.* Coupled and decoupled numerical modeling of flow and morphological evolution in alluvial rivers // *J. Hydraulic Eng. ASCE*. 2002. V. 128 (3). P. 306–321.
16. *Cunge J.A., Liggett J.A.* Unsteady Flow in Open Channels. Water Resources Publications / Eds *Mahmood K., Yevjevich V.* // Chapter 4. Numerical Methods of Unsteady Flow Equations. Colorado, 1975. P. 89–182.

17. *Kerssens P.J.M., van Rijn L.C.* Model for non-steady suspended sediment transport // Project Engineers Delft hydraulics laboratory. Delft, Netherlands, 1977. 8 p.
18. *Kondratyev S.A., Shmakova M.V.* Assessment of the spread of pollution in the riverbed of the Neva river as a result of an emergency at a toxic waste landfill // IOP Conf. Series. Earth and Environmental Science 818. Bristol, 2021. P. 12–022.
19. *Nicolas A.P., Mitchell C.A.* Numerical simulation of overbank processes in topographically complex floodplain environments // Hydrol. Processes. 2003. № 17. P. 727–746.
20. *Sanchez A., Wu W.* A non-equilibrium sediment transport model for coastal inlets and navigation channels / Eds *Roberts T.M., Rosati J. D., Wang P.* // Proc. Sympos. Honor Dr. Nicholas C. Kraus. J. Coastal Res. Special Iss. 2011. № 59. P. 39–48.
21. *Wu Weiming.* Computational River Dynamics // CRC Press. 2007. 509 p.
22. *Zheng C.Z., Zhang G.C.* Flow and Sediment Transport Numerical Modeling of Complex River Networks // Proc. Twenty-first Int. Offshore and Polar Engineering Conf. Maui, Hawaii, USA. 2011.