



УДК 556.5
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.69>

Моделирование количественных и качественных характеристик стока реки Невы в условиях внешних воздействий на водосбор

С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова*

Институт озерадения РАН – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены две задачи, связанные с изучением экологически безопасного водообеспечения Санкт-Петербурга. Это прогностические оценки возможных изменений стока р. Невы в результате климатических изменений и возможных последствий возникновения аварийной ситуации на полигоне хранения токсичных отходов «Красный Бор». Задачи решались с использованием методов математического моделирования. В качестве основы прогноза возможных климатических изменений приняты сценарии RCP 2.6 и RCP 8.5 – лучший и худший с точки зрения воздействия на окружающую среду. Расчеты стока с использованием указанных климатических сценариев показали увеличение стока по сценарию RCP 8.5 и его уменьшение по сценарию RCP 2.6. Установлено, что процесс разбавления сброшенных загрязняющих веществ с полигона «Красный Бор» по мере их продвижения к водозаборам Санкт-Петербурга зависит от сценария развития аварийной ситуации, водности и выбора значения ПДК для каждого химического вещества. Негативное воздействие разрушения обваловки карт-котлованов с загрязняющими веществами может быть несущественным для городских водозаборов за счет процессов разбавления в гидрографической сети водосбора. В то же время гипотетические катастрофические сценарии (теракт, землетрясение) в ряде случаев могут привести к возникновению серьезных проблем с качеством воды в муниципальных водозаборах.

Ключевые слова: математическая модель, климатические сценарии, речной сток, аварийные сбросы, токсичные отходы.

Благодарности: 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».

Для цитирования: Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Моделирование количественных и качественных характеристик стока реки Невы в условиях внешних воздействий на водосбор // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2022. Т. 39. С. 69–80. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.69>

Original article

Modeling of Quantitative and Qualitative Characteristics of the Neva River Runoff Under Conditions of External Influences on the Catchment

S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova*

Institute of Limnology RAS, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract. Two tasks related to the study of environmentally safe water supply in St. Petersburg have been solved. These are predictive estimates of possible changes in the runoff of the Neva River as a result of climate change and the possible consequences of an emergency at the Krasny Bor toxic wastes landfill. The tasks were solved using the methods of mathematical modeling. Scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5 are taken as the basis for predicting possible climate changes - the best and worst in terms of environmental impact. Runoff calculations using the specified climate scenarios showed an increase in runoff under the RCP 8.5 scenario and its decrease under the RCP 2.6 scenario. It has been established that the process of dilution of discharged pollutants from the Krasny Bor landfill as they transport towards the water intakes of St. Petersburg depends on the emergency scenario, hydrological conditions, and the choice of maximum permissible concentrations value for each chemical. The negative impact of the destruction of the embankment of pits with pollutants may be insignificant for municipal water intakes due to dilution processes in the hydrographic network of the catchment. At the same time, hypothetical catastrophic scenarios (terrorist attack, earthquake) in some cases can lead to serious problems with water quality in municipal water intakes.

Keywords: mathematical model, climate scenarios, river runoff, emergency discharges, toxic waste.

For citation: Kondratyev S.A., Shmakova M.V. Modeling of Quantitative and Qualitative Characteristics of the Neva River Runoff Under Conditions of External Influences on the Catchment. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2022, vol. 39, pp. 69-80. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.39.69> (in Russian)

Введение

Река Нева – протока между Ладожским озером и Финским заливом длиной 74 км. Она берет начало в Шлиссельбургской губе Ладожского озера и впадает в Невскую губу Финского залива, образуя обширную дельту, на которой расположен город Санкт-Петербург. Нева – широкая, глубокая, полноводная, малоизвилистая река. По стоку она занимает пятое место среди рек европейской части России после Волги, Печоры, Камы и Северной Двины [Нежиховский, 1981, 1985].

Нева – источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга, поэтому вопросы экологически безопасного водообеспечения являются жизненно важными для всего города [Экспериментальные исследования и ... , 2010]. В настоящей работе рассмотрены две задачи, связанные с прогностическими оценками качественных и количественных изменений стока Невы под влиянием антропогенной деятельности и возможных климатических изменений в регионе. Задачи решались с использованием методов математического моделирования.

Моделирование изменения стока Невы в результате климатических изменений

Водосбор р. Невы, имеющий площадь 183 300 км² (без водных акваторий), покрыт густой сетью водотоков (0,45 км/км²), многочисленными озерами и обширными болотами. Наиболее значительными водотоками являются реки Волхов, Свирь, Вуокса, Сясь, Оять, Паша и Мста. В среднем сток р. Невы составляет 2 500 м³/с. Отличительной ее особенностью является обильное и равномерное водное питание в течение всего года с высокой степенью зарегулированности, а также сложный уровневый режим, нехарактерный для равнинных рек северо-запада России. Нева протекает по дну Приневской низменности, представляющей собой плоскую заболоченную равнину, постепенно понижающуюся от Ладожского озера к Финскому заливу. Преобладающая

ширина реки 400–600 м. Озера играют заметную роль в общем гидрографическом облике данной территории. Наряду с наиболее значительными озерами (Ладожское, Онежское, Ильмень и расположенное на территории Финляндии оз. Сайма) здесь имеется множество средних и малых озер. Особенно ярко выражено скопление озер в системе р. Вуокса, в долине р. Свирь, в верховьях р. Сясь, а наибольшее количество озер и других водоемов – на Карельском перешейке. Большинство озер имеет ледниковое происхождение [Нежиховский, 1981, 1985].

Для решения задачи оценки возможного изменения стока Невы в результате изменений регионального климата использована модель формирования стока на водосборе [Кондратьев, Шмакова, 2019], которая предназначена для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровня воды в водоеме. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, могут задаваться в зависимости от озерности, т. е. доли площади водоемов в общей площади водосбора. Схема используемой модели формирования стока приведена на рис. 1.

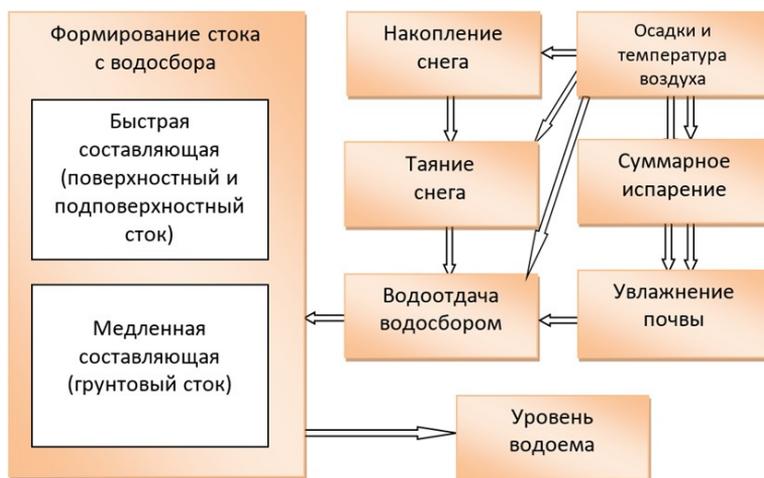


Рис. 1. Схема математической модели формирования стока на водосборе

В качестве прогноза возможных климатических изменений приняты различные сценарии социально-экономической деятельности человека RCP [Meinshausen, 2011; Moss, 2010; IPCC Special Report ... , 2000; Rogelj, Meinshausen, Knutti, 2012], а именно RCP 2.6 и RCP 8.5 – лучший и худший с точки зрения воздействия на окружающую среду соответственно.

RCP 2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO_2) начали снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы метана (CH_4) должны уменьшиться наполовину, при этом уровень выбросов диоксида серы (SO_2) составит примерно 10 % от уровня 1980–1990 гг. В RCP 8.5 выбросы продолжают расти в течение всего XXI в. теми же темпами, что и сейчас. Цифры в аббревиатурах сценариев (2.6 и 8.5) указывают на дополнительное количество энергии излучения ($\text{Вт м}^{-2}/\text{с}$), которое будет аккумулировано атмосферой в результате выбросов парниковых газов.

Значения метеорологических параметров на период до 2100 г. (осадков и температуры воздуха) рассчитаны с использованием климатической модели Института Пьера Симона Лапласа (IPSL-CM5A). Это последняя версия модели IPSL, основанная на физической модели атмосферы, суши, океана и морского льда, она также включает представление углеродного цикла, химии стратосферы и химии тропосферы с аэрозолями. Модель IPSL-CM5A участвует в Фазе 5 Проекта взаимного сравнения связанных моделей Всемирной программы исследований климата (WCRP CMIP5). Получение необходимых для расчетов данных осуществлялось путем подачи соответствующего запроса, включающего координаты места, название модели (IPSL-CM5A), тип сценария, названия метеорологических переменных и временное разрешение данных на сайте Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [CORDEX regional climate ... , 2021]. Причем охватываемый сценариями период составляет 2006–2100 гг. [Там же].

На рис. 2 приведено внутригодовое распределение среднемесячной температуры воздуха и месячных слоев осадков, осредненных за 2006–2015 гг. для метеостанции Выборг и за период 2091–2100 гг. по рассматриваемым прогнозным сценариям. В последнее десятилетие XXI в. согласно сценарию RCP 2.6 слои осадков в весенний период будут увеличены в среднем на 10 %, а в летне-осенний период уменьшатся в среднем на 13 %. Температура воздуха в среднем будет соответствовать температуре начального периода. По сценарию RCP 8.5 слои осадков будут существенно увеличены в течение всего года, за исключением августа-сентября. Среднемесячная температура воздуха также увеличится в течение года на несколько градусов. Все это, несомненно, приведет к изменениям условий формирования стока на водосборе и отразится на величине самого стока.

На рис. 3 показан годовой ход прогнозных значений по сценариям RCP 2.6 и RCP 8.5 среднегодовой температуры воздуха и годовых слоев осадков для текущего столетия. Также на рис. 3 представлены результаты расчета испарения с водосбора р. Невы и ее годового стока. Нетрудно видеть, что повышение температуры воздуха в сценарии RCP 8.5 приводит к существенному увеличению расчетных значений испарения, которое в значительной степени компенсирует увеличение стока реки за счет возрастания количества осадков. В результате к концу XXI в. сток увеличивается не более чем на 35 % относительно периода 2006–2015 гг. В то же время сценарий RCP 2.6 дает снижение стока до 11 %, так как здесь практически отсутствует возрастание температуры воздуха, а осадки имеют небольшой отрицательный тренд (табл. 1).

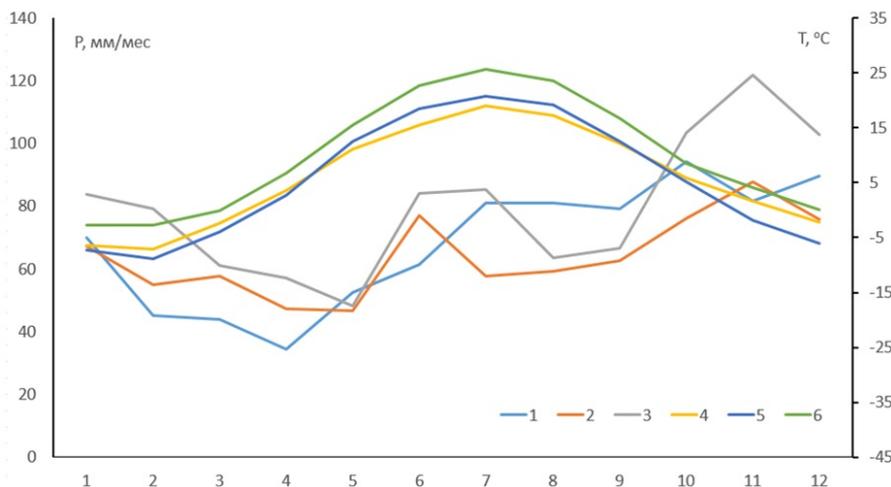


Рис. 2. Среднемесячная температура воздуха T и месячные слои осадков P для метеостанции Выборг: наблюдаемые за период 2006–2015 гг. (1 – P ; 4 – T), прогнозные по сценарию RCP 2.6 за период 2091–2100 гг. (2 – P ; 5 – T) и прогнозные по сценарию RCP 8.5 за период 2091–2100 гг. (3 – P ; 6 – T)

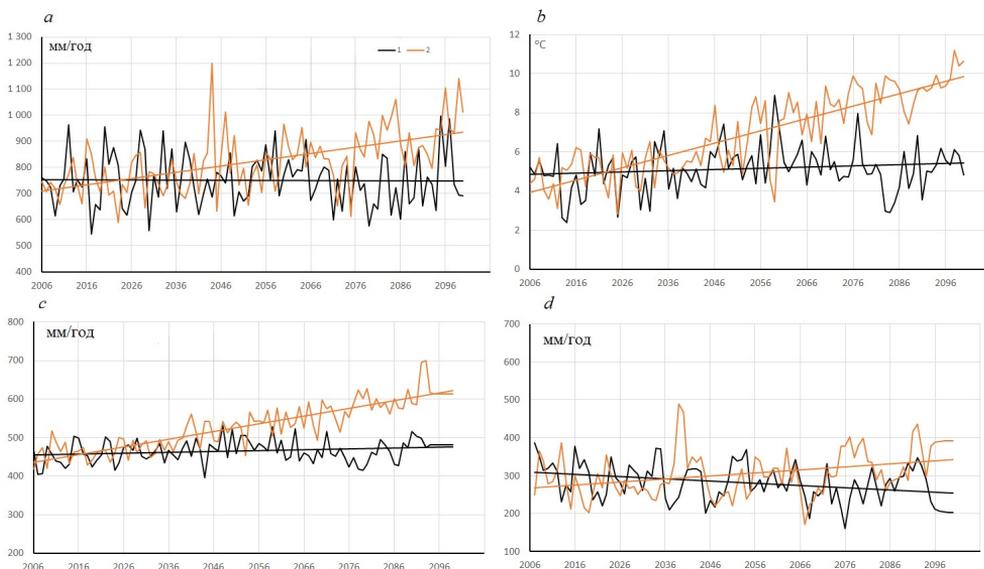


Рис. 3. Возможные изменения среднегодовых осадков (а) и температуры воздуха (b), а также рассчитанные значения испарения с водосбора (с) и стока р. Невы (d) на перспективу до 2100 г. в соответствии со сценариями RCP 2.6 – 1 и RCP 8.5 – 2

Таблица 1

Количественная оценка возможных изменений стока р. Невы, осадков и температуры воздуха по наблюдаемым данным и в результате реализации климатических сценариев RCP 2.6 и RCP 8.5

Характеристики рассматриваемого периода	Наблю- денные данные 2006– 2015 гг.	RCP 2.6 2091– 2100 гг.	RCP 8.5 2091–2100 гг.
Осадки, мм/год	814	770	957
Температура воздуха, °С	5,6	5,3	9,8
Сток, мм/год	286	254	386

Как отмечалось выше, рассмотренные сценарии отражают лучший (RCP 2.6) и худший (RCP 8.5) варианты антропогенного воздействия на окружающую среду. В то же время можно заметить, что составление каких-либо оценок и прогнозов развития социально-экономической деятельности человека на перспективу до 2100 г. является весьма неблагоприятным занятием, тем более в настоящее время. Скорее всего, ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию, так как, с одной стороны, человечество предпринимает значительные усилия по снижению выбросов в атмосферу, с другой, едва ли удастся даже к концу XXI в. достигнуть абсолютного внедрения зеленых технологий во все сферы хозяйственной деятельности на всей планете. А следовательно, и прогностическая оценка последствий климатических изменений будет находиться в промежутке между оценками, сделанными в настоящей работе по экстремальным сценариям. Таким образом, можно заключить, что не стоит ожидать экстремальных изменений гидрологического режима р. Невы.

Моделирование распространения загрязненной примеси в русле р. Невы

Одним из потенциальных источников загрязнения является полигон хранения токсичных отходов «Красный Бор», расположенный в 30 км от Санкт-Петербурга и в 15 км от устья р. Ижоры, через которую возможно поступление аварийного сброса с полигона. Это единственное предприятие для захоронения опасных производственных отходов на территории Северо-Западного федерального округа. На полигоне находится около 2 млн т токсичных отходов, которые свозились с 1969 г. с территории всей России и даже из Прибалтики. При возникновении аварийной ситуации на полигоне токсичные стоки могут попасть в р. Ижору, а затем в Неву в 7 км выше водозаборов Санкт-Петербурга [Илларионов, Лебедева, Шилов, 2011; Марова, 2011; Питулько, Кулибаба, 2016; Практика рекультивации полигона ... , 2009; Объект накопленного экологического ... , 2020].

Для решения задачи оценки воздействия возможных аварийных сбросов загрязненных вод на качество воды в водозаборах Санкт-Петербурга использованы одномерная гидравлическая модель [Singh, 2002; Smith, 1987; Cunge,

Liggett, 1975; Zheng, Zhang, 2011; Wu, 2007] и математическая модель движения воды и твердого вещества в открытом русле [Шмакова, 2018; Кондратьев, Шмакова, 2019] в трехмерной постановке, дополненная уравнениями распространения примесей [Методические основы оценки ... , 1987]. Модель предназначена для расчетов характеристик двухфазного неустановившегося движения в русле реки и основана на балансе сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы». Модель позволяет проследить перемещение взвешенного и растворенного вещества по длине русла и оценить скорость осаждения частиц в случае уменьшения транспортирующего потенциала потока (рис. 4).

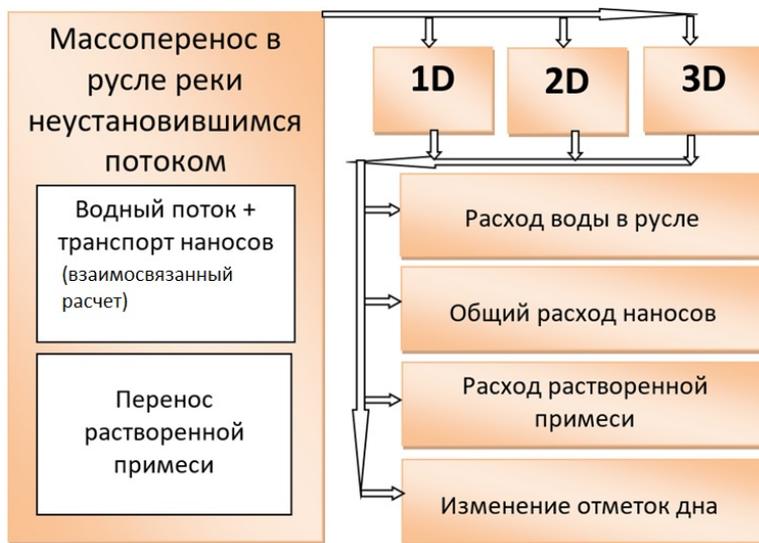


Рис. 4. Схема модели движения воды и твердого вещества в открытом русле

При решении настоящей задачи одномерная модель использовалась для расчетов переноса загрязнений в гидрографической сети притоков Невы при различных сценариях аварийного сброса. Трехмерная модель явилась средством моделирования транспорта примеси в русле Невы до водозаборов Санкт-Петербурга. При этом основной перенос примеси в русле Невы, поступившей с водосбора, приходится на вдольбереговую зону шириной около 30–35 м. Влияние поперечной турбулентной диффузии на перемешивание водных масс крайне незначительно [Кондратьев, Шмакова, 2019].

Вычисления проводились для четырех наиболее вероятных сценариев развития аварийной ситуации на полигоне, которые были определены на основе многолетних натуральных исследований на самом полигоне и окружающей его территории.

- 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 – 6 824 м³ за 96 ч.

- Сценарий 3. Разрушение обваловки котлованов № 59, 64, 66, 67 и 68 вследствие возникновения чрезвычайной ситуации (теракт, взрыв, цунами и пр.) вплоть до полного разрушения обваловки до уровня поверхности почвы. Суммарный сброс – 176 985 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 зафиксированы в районе Санкт-Петербурга). Источниками риска являются котлованы № 59, 64, 66, 67, 68, а также законсервированные карты-хранилища отходов. Объем токсикантов, попадающих во внешнюю среду, – до 50 000 м³ за 12 ч.

Результаты расчетов показали, что наиболее неблагоприятная ситуация с разбавлением сброшенных вод наблюдается при реализации четвертого сценария возможного аварийного сброса с полигона – в случае возникновения тектонических разломов в массивах кембрийских глин. При этом 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 способствует существенному возрастанию времени добега. Так, для обеспеченностей стока 75 и 97 % значение времени достижения сброса водозабора увеличится соответственно до 22,1 и 36,9 ч.

В табл. 2 приведены примеры расчета концентраций нефтепродуктов, кадмия и ртути в сброшенных сточных водах полигона по мере их продвижения к ближайшему водозабору для четырех рассмотренных сценариев аварийного сброса в условиях средней водности.

Таблица 2

Результаты расчета снижения концентраций загрязняющих веществ в сброшенных сточных водах по мере их продвижения от полигона до ближайшего водозабора Санкт-Петербурга для разных сценариев сброса

Сценарий сброса	1	2	3	4
Нефтепродукты (ПДК = 0,05 мг/л)				
Полигон	46,5	46,5	46,5	46,5
Устье р. Ижоры	0,0101	0,0970	2,064	4,598
Водозабор	0,00033	0,0032	0,071	0,170
Кадмий (ПДК = 0,005 мг/л)				
Полигон	37,5	37,5	0,375	0,375
Устье р. Ижоры	0,0000818	0,000782	0,0166	0,0371
Водозабор	0,0000027	0,000026	0,00057	0,0013
Ртуть (ПДК = 0,00001 мг/л)				
Полигон	0,0068	0,0068	0,0068	0,0068
Устье р. Ижоры	0,00000148	0,0000142	0,000302	0,000672
Водозабор	0,000000049	0,00000046	0,000010	0,000024

Примечание. Серым цветом выделены случаи превышения ПДК.

При реализации первого и второго сценариев аварийного сброса содержание кадмия окажется ниже значения предельной допустимой концентрации (ПДК) уже в устье р. Ижоры. Содержание нефтепродуктов и ртути в р. Ижоре не будет превышать ПДК только при первом сценарии сброса. Разбавление до уровня ПДК по нефтепродуктам и ртути реализуется уже в русле Невы до момента достижения первого водозабора (см. рис. 2). Последствия катастрофических сценариев сброса (3 и 4 из представленного выше перечня) будут наиболее тяжелыми по содержанию нефтепродуктов, так как ни в одной из контрольных точек их концентрация не станет ниже ПДК. Приведенный пример является свидетельством того, что процесс разбавления аварийного сброса по мере его продвижения к водозаборам Санкт-Петербурга для каждого химического вещества зависит от сценария аварийной ситуации и выбора значения ПДК. Негативное воздействие первых двух сценариев, реализация которых вполне возможна в настоящее время, может быть несущественным для муниципальных водозаборов за счет процессов разбавления в гидрографической сети, т. е. концентрации примеси в невосской 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.

Для русла Невы, кроме распространения растворенной примеси, выполнялся расчет транспорта поступивших со стоком рек Ижоры и Тосны взвешенных частиц, являющихся потенциальным носителем сорбированных на них токсикантов. В процессе выполнения расчетов показано, что все взвешенные частицы средней крупности (0,05 мм), поступившие в русло со стоком рек Ижоры и Тосны, оседают в прибрежной зоне на расстоянии не более 0,5 км от места впадения притока.

Заключение

Решены две задачи, связанные с изучением экологически безопасного водообеспечения Санкт-Петербурга, выполнены прогностические оценки возможного изменения стока Невы в результате климатических изменений и возможных последствий возникновения аварийной ситуации на полигоне хранения токсичных отходов «Красный Бор»,

Рассмотренные сценарии климатических изменений отражают лучший (RCP 2.6) и худший (RCP 8.5) варианты антропогенного воздействия на окружающую среду. Однако, скорее всего, ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию, так как, с одной стороны, человечество предпринимает значительные усилия по снижению выбросов в атмосферу, с другой – едва ли удастся даже к концу XXI в. достигнуть абсолютного внедрения зеленых технологий во все сферы хозяйственной деятельности на всей планете. Следовательно, прогностическая оценка последствий климатических изменений будет находиться в промежутке между оценками, сделанными в настоящей работе по экстремальным сценариям. Из сказанного можно заключить, что в ближайшие

десятилетия не стоит ожидать экстремальных изменений гидрологического режима водосбора р. Невы.

Показано, что процесс разбавления сброшенных загрязняющих веществ с полигона «Красный Бор» по мере их продвижения к водозаборам Санкт-Петербурга для каждого химического вещества зависит от сценария аварийной ситуации и выбора значения ПДК. Негативное воздействие первых двух сценариев (описание представлено выше), реализация которых вполне вероятна в настоящее время, может быть несущественным для водозаборов за счет процессов разбавления в гидрографической сети водосбора, т. е. концентрации примеси в невиской воде в контрольных точках не превысят ПДК. В то же время гипотетические катастрофические сценарии (3 и 4) в ряде случаев могут привести к серьезным проблемам с качеством воды в муниципальных водозаборах.

Список литературы

- Илларионов А. В., Лебедева А. А., Шилов Д. В.* Разработка комплексной программы системы наблюдений за состоянием окружающей среды вблизи полигона токсичных отходов «Красный Бор» // Ученые записки РГГМУ. 2011. Вып. 22. С. 211–220.
- Кондратьев С. А., Шмакова М. В.* Математическое моделирование в системе водосбор – водоток – водоем. СПб. : Нестор-История, 2019. 248 с.
- Марова А. В.* Методы обеспечения экологической безопасности полигона Красный Бор на основе рискологического подхода : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2011. 27 с.
- Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 288 с.
- Нежиховский Р. А.* Вопросы формирования качества воды реки Невы и Невской губы. Л. : Гидрометеиздат, 1985. 106 с.
- Нежиховский Р. А.* Река Нева и Невская губа. Л. : Гидрометеиздат, 1981. 112 с.
- Объект накопленного экологического вреда полигон токсичных отходов «Красный Бор» : доклад. СПб. : ЭПЦ «БЕЛЛОНА» ; АНО содействия охране окружающей среды Экспертно-правовой центр «ЭкоПраво», 2020. 87 с.
- Питулько В. М., Кулибаба В. В.* Концепция технического решения ликвидации угрозы прорыва жидких отходов из карт полигона Красный Бор и направления последующей его рекультивации // Региональная экология. 2016. № 2 (44)–3(45). С. 43–51.
- Практика рекультивации полигона промышленных токсичных отходов СПб ГУПП Полигон «Красный бор» / С. В. Сольский, Е. В. Герасимова, Н. В. Дубровская, А. В. Козлова, С. Г. Климовский // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2009. Т. 253. С. 62–72.
- Шмакова М. В.* Расчеты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб. : ВВМ, 2018. 149 с.
- Экспериментальные исследования и моделирование формирования качества воды в реке Нева / В. А. Румянцев, С. А. Кондратьев, Ш. Р. Поздняков, В. Н. Рыбакин, А. М. Крючков, А. И. Моисеенков, М. В. Шмакова, А. А. Ершова // Известия РГО. 2010. Т. 142. С. 24–31.
- CORDEX regional climate model data on single levels // European Centre for Medium-Range Weather Forecast. 2021. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview> (дата обращения: 25.12.2021).
- Cunge J. A., Liggett J. A.* Unsteady Flow in Open Channels. Water Resources Publications / K. Mahmood, V. Yevjevich, eds. // Chapter 4. Numerical Methods of Unsteady Flow Equations. Colorado, 1975. P. 89–182.
- IPCC Special Report on Emissions Scenarios / N. Nakicenovic, R. Swart, eds. Cambridge : Cambridge University Press, 2000. 600 p.
- Meinshausen M., 2011:* The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Clim. Change. Vol. 109. P. 213–241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

- Moss R. H. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature. 2010. Vol. 463. P. 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates // Nature Clim. Change. 2012. Vol. 2. P. 248–253. <https://doi.org/10.1038/nclimate1385>
- Singh V. Two dimensional sediment transport model using parallel computers. India. B. Tech. Banaras Hindu University, 2002. 109 p.
- Smith R. A two-equation model for contaminant dispersion in natural streams // J. Fluid Mech. 1987. Vol. 178. P. 257–277.
- Wu. W. Computational River Dynamics. CRC Press, 2007. 509 p.
- Zheng C. Z., Zhang G. C. Flow and Sediment Transport Numerical Modeling of Complex River Networks // Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference. June 19–24. Maui, Hawaii, USA. 2011.

References

- Illarionov A.V., Lebedeva A.A., Shilov D.V. Razrabotka kompleksnoj programmy sistemy nabljudenij za sostojaniem okružhajushhej sredy vblizi poligona toksichnyh othodov “Krasnyj Bor” [Development of a comprehensive program for monitoring the state of the environment near the Krasny Bor toxic waste landfill]. *Uchenye zapiski RGGMU* [Scientific notes of RSHU], 2011, vol. 22, pp. 211–220. (in Russian)
- Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. *Matematicheskoe modelirovanie v sisteme vodosbor - vodotok - vodoem* [Mathematical modeling in the catchment – watercourse – reservoir system]. Saint-Petersburg, Nestor-Istorija Publ., 2019, 248 p. (in Russian)
- Marova A.V. *Metody obespečenija jekologičeskogo bezopasnosti poligona Krasnyj Bor na osnove riskologičeskogo podhoda* [Methods of ensuring environmental safety of the Krasny Bor landfill based on an ecological approach. Cand. sci. diss. abstr]. Saint-Petersburg, RSHU, 2011, 27 p. (in Russian)
- Metodicheskie osnovy ocenki i reglamentirovanija antropogennogo vlijanija na kachestvo poverhnostnyh vod* [Methodological bases of assessment and regulation of anthropogenic impact on surface water quality]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 288 p. (in Russian)
- Nezhihovskij R.A. *Voprosy formirovanija kachestva vody reki Nevy i Nevskoj guby* [Issues of formation of water quality of the Neva River and the Neva Bay]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985, 106 p. (in Russian)
- Nezhihovskij R. A. *Reka Neva i Nevskaja guba* [Neva River and Neva Bay]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1981, 112 p. (in Russian)
- Ob'ekt nakoplennoego jekologičeskogo vreda poligon toksichnyh othodov “Krasnyj Bor”*. Doklad [The object of accumulated environmental damage is the toxic waste landfill “Krasny Bor”. Report]. Saint-Petersburg, EPC “BELLONA” ANO Environmental Protection Assistance “EcoPravo Expert Legal Center” Press., 2020. 87 p. (in Russian)
- Pitul'ko V.M., Kulibaba V.V. *Koncepcija tehničeskogo reshenija likvidacii угрозы proryva zhidkih othodov iz kart poligona Krasnyj Bor i napravlenija posledujushhej ego rekul'tivacii* [The concept of a technical solution to eliminate the threat of a breakthrough of liquid waste from the maps of the Krasny Bor landfill and the direction of its subsequent reclamation]. *Regional'naja jekologija* [Regional ecology]. 2016, no. 2 (44), 3(45), pp. 43–51. (in Russian)
- Sol'skij S.V., Gerasimova E.V., Dubrovskaja N.V., Kozlova A.V., Klimovskij S.G. *Praktika rekul'tivacii poligona promyšlennyh toksichnyh othodov SPb GUPP “Poligon “Krasnyj bor”* [The practice of recultivation of the landfill of industrial toxic waste of St. Petersburg GUPP “Landfill ‘Krasny Bor’]. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [News of VSRIG named after B.E. Vedeneev], 2009, vol. 253, pp. 62–72. (in Russian)
- Shmakova M.V. *Rasčety tverdogo stoka rek i zailenija vodohranilišh* [Calculations of solid river runoff and siltation of reservoirs]. Saint-Petersburg, VVM Publ., 2018, 149 p. (in Russian)
- Rumjancev V.A., Kondrat'ev S.A., Pozdnjakov Sh.R., Rybakin V.N., Krjuchkov A.M., Moiseenkov A.I., Shmakova M.V., Ershova A.A. *Jeksperimental'nye issledovanija i modelirovanie formirovanija kachestva vody v reke Neva* [Experimental studies and modeling of the formation of

water quality in the Neva River]. *Izvestija RGO* [News of the Russian Geographical Society], 2010, vol. 142, pp. 24-31. (in Russian)

CORDEX regional climate model data on single levels. *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*, 2021. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview> (date of access: 25.12.2021).

Cunge J.A., Liggett J.A. *Unsteady Flow in Open Channels*. Water Resources Publications. *Numerical Methods of Unsteady Flow Equations*, Chapter 4. Colorado, 1975, pp. 89-182.

IPCC Special Report on Emissions Scenarios. N. Nakicenovic, R. Swart, eds. Cambridge, Cambridge University Press., 2000

Meinshausen M. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change*, 2011, vol. 109, pp. 213-241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

Moss R. H. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 2010, vol. 463, pp. 747-756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Clim. Change*, 2012, vol. 2, pp. 48-253. <https://doi.org/10.1038/nclimate1385>

Singh V. *Two dimensional sediment transport model using parallel computers*. India, B. Tech. Banaras Hindu University, 2002. 109 p.

Smith R. A two-equation model for contaminant dispersion in natural streams. *J. Fluid Mech.*, vol. 178, 1987, pp. 257-277.

Weiming Wu. *Computational River Dynamics*. CRC Press, 2007. 509 p.

Zheng C., Z., Zhang G. C. Flow and Sediment Transport Numerical Modeling of Complex River Networks. *Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference*. June 19-24. Maui, Hawaii, USA, 2011.

Сведения об авторах

Кондратьев Сергей Алексеевич

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
заведующий, лаборатория математических
методов моделирования
Институт озераедения РАН –
Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН
Россия, 196105, г. Санкт-Петербург,
ул. Севастьянова, 9
e-mail: 3718470@gmail.com

Шмакова Марина Валентиновна

доктор географических наук
ведущий научный сотрудник
лаборатория математических методов
моделирования
Институт озераедения РАН – Санкт-
Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН
Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, ул.
Севастьянова, 9
e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Information about the authors

Kondratyev Sergey Alekseevich

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics)
Chief Scientific Officer, Head
Laboratory of Mathematical Modeling
Methods
Institute of Limnology RAS
9, Sevastyanov st., Saint-Petersburg, 196105,
Russian Federation
e-mail: 3718470@gmail.com

Shmakova Marina Valentinovna

Doctor of Science (Geography), Leading
Researcher, Laboratory of Mathematical
Modeling Methods
Institute of Limnology RAS
9, Sevastyanov st., Saint-Petersburg, 196105,
Russian Federation
e-mail: m-shmakova@yandex.ru

Код научной специальности: 25.00.27

Статья поступила в редакцию **25.01.2022**; одобрена после рецензирования **14.02.2022**; принята к публикации **03.03.2022**
The article was submitted **January, 25, 2022**; approved after reviewing **February, 14, 2022**; accepted for publication **March, 3, 2022**