

УДК 556.5

© С. А. Кондратьев*, М. В. Шмакова, Н. В. Игнатьева, Е. В. Иванова, В. В. Гузиватый
 Институт озероведения РАН, 196105, ул. Севастьянова, д. 9, г. Санкт-Петербург, Россия
 *e-mail: kondratyev@limno.org.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОД РЕКИ ИЖОРЫ В РУСЛЕ РЕКИ НЕВЫ

Статья поступила в редакцию 21.02.2020, после доработки 14.04.2020

Выполнено экспериментальное исследование по оценке траекторий распространения в акватории Невы вод одного из наиболее загрязненных притоков — реки Ижоры. Идентификация воды притока в русле Невы производилась на основе оценки величины общей минерализации (TDS), а также дополнительной интегральной характеристики качества воды — окислительно-восстановительного потенциала (Eh). На основе анализа результатов проведенного натурного эксперимента показано, что воды притоков (возможно загрязненные) после поступления в русло Невы прижимаются основным потоком к берегу и распространяются вдоль него в направлении течения, при этом поперечная турбулентная диффузия, способствующая перемешиванию водных масс, крайне незначительна. Для математического описания процесса массопереноса в русле Невы использована сопряженная математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле IL_MTRiver, разработанная в Институте озероведения РАН. В модели реализован взаимосвязанный расчет переменных состояния водного потока и потока твердого вещества. Единая система расчета движения воды и взвешенных частиц с физически обоснованной аппроксимацией процесса позволяет проследить перемещение взвешенного вещества по длине русла и оценить скорость осаждения частиц в случае уменьшения транспортирующего потенциала потока в соответствии со своей гидравлической крупностью и исходной скоростью перемещения. Взаимодействие движущегося потока и подстилающей поверхности в модели представлено физически обоснованными параметрами — коэффициентом внутреннего трения грунта и параметром сцепления грунта при сдвиге. Показано, что модель адекватно оценивает вдольбереговое распространение примеси при отсутствии перемешивания по сечению основного потока. В дальнейшем модель IL_MTRiver может быть использована для решения задач оценки возможного загрязнения невоской воды в районе городских водозаборов и прогноза последствий возникновения аварийных ситуаций, связанных со сбросом загрязненных стоков, на близлежащих предприятиях, в том числе и на полигоне Красный Бор.

Ключевые слова: Нева, Ижора, приток, натурные измерения, математическое моделирование.

© S. A. Kondratyev*, M. V. Shmakova, N. V. Ignatieva, E. V. Ivanova, V. V. Guzivaty
 Institute of Limnology RAS, 196105, Sevastyanova Str., 9, St. Petersburg, Russia
 *e-mail: kondratyev@limno.org.ru

EXPERIMENTAL AND MODEL STUDIES OF THE IZHORA RIVER WATERS SPREADING IN THE NEVA RIVER

Received 21.02.2020, in final form 14.04.2020

An experimental study of the distribution paths in the Neva River aquatic area one of the most polluted tributaries the Izhora River was carried out. Identification of tributary water in the Neva River was made based on the measurements of total dissolved solids values (TDS), as well as additional integral characteristic of water quality — redox potential (Eh). Based on the analysis of the results of the field experiment, it is shown that the waters of the tributaries (possibly polluted), after entering the Neva River, are pressed by the main stream to the shore and spread along it in the direction of the current. The effect of transverse turbulent diffusion, which contributes to the mixing of water masses, is insignificant. For the mathematical description of the mass transfer process in the Neva River, a conjugate mathematical model IL_MTRiver of the water flow, sediment transport and dissolved impurities in the open channel, developed at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, is used. The model implements an interconnected calculation of the variables of the state of the water flow and solid flow. A unified model allows to track the movement of water and suspended matter along the river channel and estimate the particles deposition rate. The

Ссылка для цитирования: Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Игнатьева Н.В., Иванова Е.В., Гузиватый В.В. Экспериментальные и модельные исследования распространения вод реки Ижоры в русле реки Невы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 3. С. 83–92. doi: 10.7868/S2073667320030077

For citation: Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Ignatyeva N.V., Ivanova E.V., Guzivaty V.V. Experimental and Model Studies of the Izhora River Waters Spreading in the Neva River. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2020, 13, 3, 83–92. doi: 10.7868/S2073667320030077

interaction in the model of the moving stream and the river channel is represented by physically justified parameters — the coefficient of internal friction of the soil and the adhesion parameter of the soil particles in case of displacement. It is shown that the model adequately estimates the coastal distribution of impurities in the absence of mixing over the main flow cross section. In the future, the IL_MTRiver model can be used to solve the problems of assessing the possible pollution of Neva water in the area of urban water intakes and to predict the consequences of emergencies associated with the discharge of contaminated effluents at nearby enterprises, including the Krasny Bor toxic waste landfill.

Key words: Neva, Izhora, tributary, field measurements, mathematical modeling

1. Введение

Река Нева — источник питьевого водоснабжения Санкт-Петербурга. Забор воды осуществляется на нескольких водопроводных станциях, расположенных в черте города. Основная масса невских вод поступает из Ладожского озера и, как правило, соответствует требованиям, предъявляемым к объектам питьевого водоснабжения. Несмотря на небольшую протяженность, Нева имеет несколько притоков со значительно худшими показателями качества воды по сравнению с ладожской водой, которые расположены выше водозаборов — это реки Черная, Мга, Тосна, Ижора, Славянка и Охта с притоком Оккервиль. На водосборах этих рек расположено большое количество промышленных, сельскохозяйственных и муниципальных предприятий с высоким риском возникновения нештатных экстремальных ситуаций, последствия которых могут негативно сказаться на качестве воды в городских водозаборах. В этой связи высокую актуальность приобретает проблема оценки возможного попадания загрязнений в городские водозаборы.

Целью настоящего исследования является выявление закономерностей и особенностей распространения вод притоков в акватории Невы с использованием методов натуральных исследований и математического моделирования. Для достижения поставленной цели решались две основные задачи:

— Выявление закономерностей и особенностей распространения вод притоков в акватории Невы в местах их впадения на основе данных натуральных наблюдений;

— Выбор математической модели, адекватно описывающей перенос в акватории Невы поступивших с водами притоков растворенных и взвешенных примесей, а также выполнение имитационных расчетов, иллюстрирующих перспективы дальнейшего использования модели.

Попытки расчетов распространения вод притоков в Неве предпринимались и ранее [Румянцев и др., 2010; Кондратьев, Шмакова, 2019], однако экспериментального подтверждения их результаты не имели. В качестве основного объекта исследования выбрана река Ижора — один из наиболее загрязненных притоков Невы, расположенный выше водозаборов Санкт-Петербурга [1–7]. Река берёт начало на Ижорской возвышенности из родника у д. Скворицы и впадает в Неву с левого берега в 34 км от ее устья. Длина реки составляет 76 км, площадь водосбора около 1000 км². Среднегодовой расход воды составляет 8.47 м³/с. Значительную площадь водосбора занимают сельскохозяйственные угодья и пойменные луга. Естественная растительность носит вторичный характер, естественных лесов практически нет. На берегах реки Ижоры расположено более 30 населенных пунктов, оказывающих на нее антропогенное воздействие различного характера и интенсивности. Так, в Скворицах разводят крупный рогатый скот, в Пудости расположена птицефабрика. Кроме того, на водосборе р. Ижоры находится одно из старейших промышленных предприятий России — Ижорские заводы, а также производственные фирмы ТехноБалт, Бахус, Илком, Энергобумпром, Петролес, бумажная фабрика Коммунар, картонно-полиграфический комбинат, фабрика нетканых материалов и многие другие промышленные предприятия. В нижнем течении река принимает сток с полигона обезвреживания и захоронения токсичных отходов Красный Бор, в могильниках которого находится около 2 млн тонн токсичных отходов I — V классов опасности, включающих как неорганические, так и органические вещества. О возможной утечке с территории полигона, приводящей к загрязнению окружающей среды, — расположенных вблизи полигона полей, рек и ручьев, а также атмосферы, — стало известно еще в середине 1990-х гг. В настоящее время вода реки непригодна для купания, питья и рыбной ловли. При этом ниже по течению от места впадения Ижоры расположено несколько водозаборов ГУП Водоканал СПб, ориентировочное расположение которых показано на рис. 1.

2. Натурный эксперимент

Для оценки траектории распространения в акватории Невы вод реки Ижоры, в которую поступают сточные воды перечисленных выше потенциальных источников загрязнения, в том числе с полигона Красный Бор, было выполнено экспериментальное исследование. Перечень химических веществ, хранящихся в могильниках полигона, включает тысячи, а возможно, десятки тысяч наименований. Определить кон-

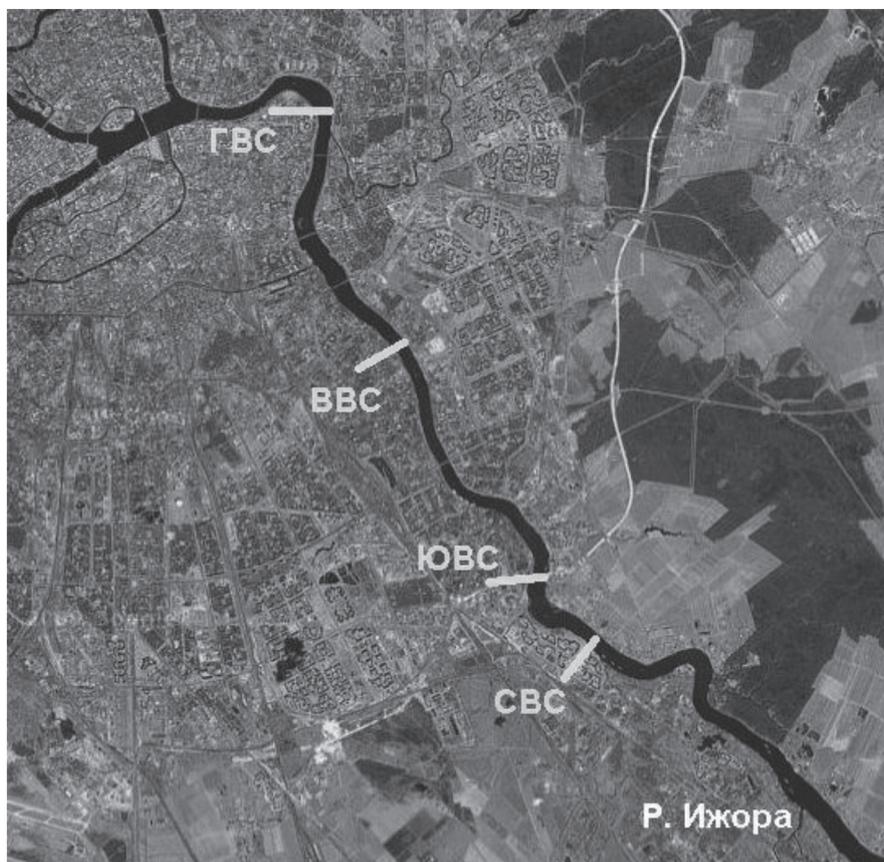


Рис. 1. Ориентировочное расположение городских водозаборов на р. Неве ниже впадения р. Ижоры (СВС — Северная водопроводная станция, ЮВС — Южная водопроводная станция, ВВС — Волковская водопроводная станция, ГВС — Главная водопроводная станция).

Fig. 1. Approximate location of city water intakes on the River Neva below the River Izhora inflow (СВС — Northern Waterworks, ЮВС — Southern Waterworks, ВВС — Volkovskaya Waterworks, ГВС — Main Waterworks).

центрации всех или даже незначительной части этих веществ — задача практически невыполнимая. Поэтому в рамках данного исследования в качестве индикатора распространения вод была использована общая минерализация — интегральная характеристика водной массы, позволяющая достоверно различать воды Невы и воды притоков. TDS характеризует суммарное содержание всех найденных при химическом анализе воды минеральных веществ и определяет ее удельную электропроводность. В природных водах общая минерализация обусловлена преимущественно присутствием семи главных ионов: HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и отражает природные особенности водосборной территории, поэтому по абсолютному значению TDS при одноразовом измерении в одной точке акватории невозможно судить о степени экологического неблагополучия отдельного водного объекта. Однако, в случае отсутствия поступления вод, имеющих более высокую природную минерализацию, например, подземных вод или поверхностного притока, пространственная горизонтальная или вертикальная неоднородность водной массы по величине TDS может свидетельствовать о наличии локального загрязнения отдельных частей водного объекта.

В качестве дополнительной интегральной характеристики был использован окислительно-восстановительный потенциал. В природных водах от этой характеристики в значительной степени зависит жизнедеятельность микроорганизмов, направление и пути биохимической трансформации органического вещества. Значение Eh определяется всей совокупностью происходящих в водоеме окислительных и восстановительных процессов и в условиях равновесия характеризует анализируемую среду сразу относительно всех элементов, имеющих переменную валентность. Однако в природных водах основной вклад в величину окислительно-восстановительного потенциала вносит система кислорода.

Натурный эксперимент был проведен 14 июля 2019 г. в условиях средней водности реки Невы ($-2500 \text{ м}^3/\text{с}$). Измерения выполнялись *insitu* в 45 фиксированных точках, расположенных на акватории р. Ижоры, в том числе в ее устье, и в русле Невы. Измерения TDS проводились с использованием многоканального портативного анализатора Milwaukee (MW 802 pH/EC/TDSMeter), Eh — ОВП-метра San-XinORP-504.

В табл. 1 приведены диапазоны измеренных в ходе натурального эксперимента характеристик водных масс рек Ижоры и Невы — общей минерализации и окислительно-восстановительного потенциала. На рис. 2 и 3 представлены схемы распределения этих характеристик в исследуемом участке акватории (см. вклейку).

Таблица 1

Диапазоны измеренных характеристик водных масс рек Ижоры и Невы 14.07.2019
Ranges of measured characteristics of water masses of the Rivers Izhora and Neva 14.07.2019

Характеристика	Река Ижора	Устье р. Ижоры	Вдольбереговые воды р. Невы	Воды р. Невы на фарватере
TDS, мг/л	410–420	117–410	70–120	40
Eh, мВ	187–223	236–273	266–289	275–297

Как видно из приведенных данных, общая минерализация вод р. Ижоры практически на порядок превышает TDS невых вод. Наибольший разброс значений закономерно отмечен на устьевом участке р. Ижоры, в разных точках которого доля тех или иных водных масс существенно варьирует. На акватории р. Невы повышенные значения TDS по сравнению с водами на фарватере отмечены во вдольбереговых водах, причем по мере распространения вод Ижоры от устьевого участка в направлении течения Невы на исследуемом участке акватории наблюдалось постепенное снижение TDS со 120 до 70 мг/л, что свидетельствует о наличии поперечной турбулентной диффузии, однако ее влияние на перемешивание водных масс крайне незначительно. Так, на расстоянии от устья Ижоры 105, 175, 425–850, 1100–1640 и 1920 м соответствующие значения TDS составляли 110, 100, 90, 80 и 70 мг/л. Таким образом, почти через 2 км от места впадения вод притока значение общей минерализации воды снизилось на 60%.

Наименьшие значения окислительно-восстановительного потенциала отмечены в водах р. Ижоры. Очевидно, сдвиг значений Eh в восстановительную область связан, главным образом, с кислородным дефицитом, наличие которого в водах притока в летний период регулярно отмечается в ежегодниках «Качество поверхностных вод Российской Федерации» [1–7]. Пониженные значения Eh отмечены в устье Ижоры и во вдольбереговой зоне в направлении течения Невы. Наиболее высокие значения Eh характерны для невых вод на фарватере. В результате аэрации в русле Невы, сдвига окислительно-восстановительных равновесий в соответствии с условиями среды на локальных участках нехской акватории и перемешивания водных масс под влиянием поперечной турбулентной диффузии по мере распространения ижорских вод в направлении течения Невы наблюдается постепенный рост значений Eh с 266 мВ в 15 м от устья Ижоры до 288 мВ на расстоянии 1920 м от устья.

Таким образом, на основе анализа результатов проведенного натурального эксперимента удалось показать, что воды одного из наиболее загрязненных притоков после поступления в русло Невы прижимаются основным течением реки к берегу и распространяются вдоль него в направлении течения. При этом под влиянием поперечной турбулентной диффузии происходит постепенное перемешивание водных масс, в результате чего характеристики вдольбереговых вод и невых вод на фарватере по мере удаления от устья притока имеют тенденцию к выравниванию. Однако, в целом, влияние поперечной турбулентной диффузии на перемешивание водных масс крайне незначительно.

3. Моделирование

Вопросами математического моделирования русловых потоков занимались известные отечественные и зарубежные исследователи, такие как [8–14] и другие [15–19]. В настоящее время широкое практическое распространение при решении проблем массопереноса в руслах рек получили различные программные комплексы, такие как Волна, Cardinal, River, GeoniCS [20], MIKE11 [21], HEC-RAS [22], SOBEK [23] и другие. В основе этих комплексов как правило лежат уравнения Сен-Венана в разной численной реализации с различными дополнениями. При достаточно большом количестве разработанных моделей русловых потоков основные различия между ними заключаются в принятой расчетной схеме и форме представления транспорта наносов [19]. Эти модели могут быть классифицированы не только по признакам размерности и стационарности, но и по характеру расчетной схемы, а также взаимосвязанности расчетов потоков воды и твердого вещества.

Анализ результатов создания и практического использования гидравлических моделей однофазных и двухфазных речных потоков в одно-, дву- и трехмерных постановках а также численных схем их реализации представлен в [19]. Отмечается, что уравнение двухфазного потока является выражением баланса вещества водно-песчаной смеси в речном потоке и решается относительно объемной концентрации наносов.

Как показано в работе [8], при незначительных концентрациях твердого вещества в потоке для его описания могут быть использованы несопряженные модели, предполагающие независимый расчет водного потока и транспорта наносов. Подобные модели достаточно широко используются при решении широкого круга инженерных задач. Это относительно простые в практической реализации системы гидродинамических моделей и эмпирических формул. Однако, область применения таких моделей ограничена низкой концентрацией твердого вещества в потоке. Сопряженные модели учитывают гидравлическую связь потока воды и твердого вещества. Численные схемы реализации этих моделей более устойчивы [19, 24, 25] и могут использовать бóльший шаг по времени в отличие от несопряженных моделей. При этом сопряженные модели обеспечивают решение более широкого диапазона инженерных задач [19]. В настоящем исследовании использована сопряженная математическая модель движения воды, транспорта наносов и растворенных примесей в открытом русле IL_MTRiver — Institute of Limnology model of Mass Transport in River (Свидетельство о государственной регистрации 2016612803 от 10.03.2016), разработанная в Институте озераведения РАН [26, 27]. Модель основана на математическом представлении сил, действующих в системе «водный поток — донные отложения — наносы» [27]:

$$(1-f)\left(mg\left[I-\frac{\partial h}{\partial x}\right]-m\frac{dv}{dt}\right)-N_{act}m_{ч}\frac{dv_{ч}}{dt}+N_{act}m_{ч}g-cS=0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}+h\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial h}{\partial x}=0, \quad (2)$$

$$v_{ч}=\sqrt{v^2+\omega^2}, \quad (3)$$

$$\frac{dE_{потока}}{dt}-\frac{dE_{частиц}}{dt}=0, \quad (4)$$

где m — масса объема воды, заключенного между двумя расчетными створами, кг; g — ускорение свободного падения, м/с²; I — уклон дна, б/р; v — скорость потока, м/с; h — глубина потока, м; x — продольная координата, м; S — площадь приложения давления, м²; $m_{ч}$ — масса частицы, кг; $v_{ч}$ — скорость движения частицы, м/с; N_{act} — количество перемещаемых частиц в потоке; ω — гидравлическая крупность частицы, м/с; $E_{потока}$ — кинетическая энергия потока, кг м²/с²; $E_{частиц}$ — кинетическая энергия движущихся частиц, кг·м²/с²; f — коэффициент внутреннего трения, б/р; c — параметр сцепления частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²); S — площадь приложения силы, м².

Уравнение движения воды и твердого вещества (1) замыкается уравнениями неразрывности потока (2), скорости движения частицы в потоке (3) и уравнением баланса кинетической энергии потока и частиц (4). Важно заметить, что в модели используется вес частицы в воде. Деление движущихся наносов на взвешенные и влекомые можно осуществить с помощью известных в гидрологии соотношений между взвешенными и влекомыми наносами [27, 28].

Параметры f и c формулы в настоящее время уточняются [27]. Следует заметить, что коэффициент внутреннего трения f может быть больше единицы, тогда как для сухого грунта он, как правило, полагается менее единицы. Это объясняется тем, что угол предельного откоса грунта (тангенс которого и есть коэффициент внутреннего трения) в мокрой наклонной среде (с учетом гидростатического давления) может быть больше, чем для сухого грунта, то есть превышать 45°. Также следует заметить, что параметры трения являются функцией водности речного потока. То есть для одного и того же гидрометрического створа эти параметры в межень и половодье будут отличаться [27].

Для расчета переноса растворенных примесей русловым потоком система уравнений (2.52)–(2.55) дополняется уравнением турбулентной диффузии [29]:

$$\frac{dC'}{dt}=[D\Delta C'], \quad (5)$$

где C' — концентрация растворенного вещества в воде, г/м³, мг/л или в других единицах; $\langle D \rangle$ — тензор 1-го ранга коэффициентов турбулентной диффузии в потоке (м²/с), Δ — оператор Лапласа.

Переменными состояниями модели, основанной на уравнениях (1)–(4) и описывающей движение воды, транспорт и переотложение наносов в открытом русле, а также перенос растворенных примесей с использованием уравнения (5), являются средняя скорость и глубина потока, скорость движения и количество (масса) частиц, концентрация растворенного вещества в воде. Параметры модели — коэффициент внутреннего трения, параметр сцепления грунта при сдвиге, гидравлическая крупность частиц, коэффициент турбулентной диффузии в потоке.

Особенности настоящей модели заключаются в следующем:

— В модели реализован взаимосвязанный расчет переменных состояний водного потока и потока твердого вещества. Единая система расчета движения воды и взвешенных частиц с физической обоснованной аппроксимацией процесса позволяет проследить перемещение взвешенного вещества по длине русла и оценить скорость осаждения частиц в случае уменьшения транспортирующего потенциала потока в соответствии со своей гидравлической крупностью и исходной скоростью перемещения.

— Взаимодействие движущегося потока и подстилающей поверхности в модели представлено физически обоснованными параметрами — коэффициентом внутреннего трения грунта и параметром сцепления грунта при сдвиге.

К числу задач, которые могут быть решены с помощью предложенной модели, можно отнести:

— Оценка переменных состояний потока (глубины потока, скорости движения воды, количества наносов и скорости их движения (то есть расхода наносов));

— Расчет вертикальных деформаций русла (перемещение и осаждение/взмыв твердого вещества в потоке);

— Распространение растворенных примесей в речном потоке, поступающих от различных точечных и рассредоточенных источников загрязнения;

— Расчет траекторий движения примесей и условий их попадания в важные с инженерной точки зрения места, например, в водозаборы;

— Выполнение имитационных расчетов по выбору оптимального расположения инженерных сооружений в русле реки.

На основе численной реализации уравнений (1)–(5) в трехмерной постановке, реализованной методом конечных элементов [27], были проведены расчеты гидравлических переменных состояний речного потока для 60-километрового участка р. Невы (от крепости Орешек до Большеохтинского моста). В рассматриваемой задаче трехмерная структура руслового потока аппроксимировалась совокупностью боксов, образуемых в результате разбиения русла вертикальными и горизонтальными плоскостями. В интерфейсе модели предусмотрен выбор произвольного количества вертикальных и горизонтальных слоев. Продольный размер бокса dx и шаг расчетов по времени dt связаны между собой соотношением, обеспечивающим устойчивость численной схемы интегрирования исходных уравнений. Расчет проводился последовательно по отдельным боксам с учетом значений переменных состояний модели, полученных в соседних боксах в настоящий и прошлый моменты времени.

Всего на этом участке было намечено 24 гидрометрических створа, в которых через 10 м были проведены промеры глубин. Данные о расходе воды были получены по кривой $Q = f(H)$ для створа р. Невы — д. Новосаратовка на время проведения гидрометрических работ. Глубина для начальных и граничных условий в расчетных створах вычислялась интерполяцией между двумя соседними гидрометрическими створами, на которых проводились измерения. Аналогично была получена и площадь поперечного сечения, необходимая для расчета скорости воды при задании начальных и граничных условий.

При численной реализации модели размер ячеек криволинейной расчетной сетки составлял по продольной ординате 200 м, по ширине — около 33 м, глубине — около 2 м, шаг по времени — 2 с. Примерно через 300 расчетных шагов по времени модель выходит на стационарный режим расчета. Модель адекватно описывает гидродинамическую ситуацию на расчетном участке реки в условиях неравномерного установившегося движения потока. Критерий Нэша-Сатклиффа NSE составил 92%.

Расчеты переноса примеси в реке Неве выполнялись при среднем многолетнем значении расхода воды (2500 м³/с), а также при его экстремальных значениях 1000 м³/с и 4000 м³/с. Для расчета транспорта и переотложения наносов в русле р. Невы принимался средний по величине размер русловых фракций (0.33 мм). Концентрация растворенной консервативной примеси при впадении Ижоры в Неву принималась равной 1, что позволяет провести последующий пересчет результатов моделирования на любое конкретное значение концентрации. Фоновое значение концентрации примеси в Неве принималось равным нулю. Результаты расчетов представлены на рис. 4, см. вклейку. Рис. 5 иллюстрирует изменение концентрации примеси по ширине реки в створе ближайшего водозабора ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

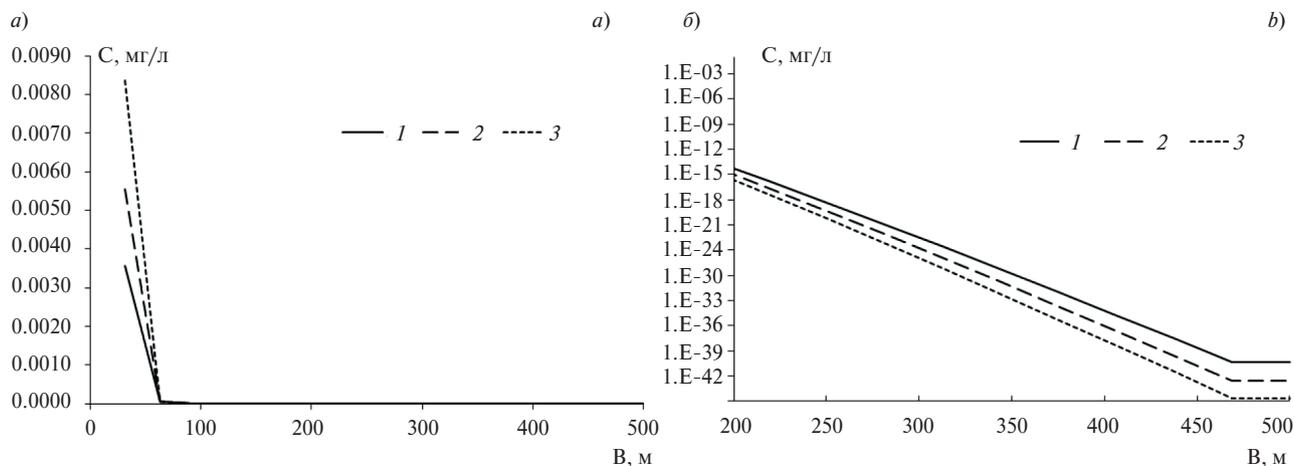


Рис. 5. Изменение концентрации примеси C по ширине русла B при различных расходах воды Q в равномерной (а) и логарифмической (б) шкалах: 1 – $Q = 400 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Fig. 5. Change in the impurity concentration C along the width of the river channel B at different water discharges Q in uniform (a) and logarithmic (b) scales: 1 – $Q = 400 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – $Q = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$.

Таблица 2

Рассчитанные значения максимальных концентраций консервативной примеси, ($C'_{\text{макс}}$, мг/л) в створах расположения водозаборов ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» через 5 часов после поступления загрязненных вод из реки Ижоры

Calculated values of the maximum concentrations of the conservative impurity, (C'_{max} , mg/l) in the cross sections of the water intakes location of the State Unitary Enterprise “Vodokanal of St. Petersburg” 5 hours after the entry of contaminated water from the River Izhora

№ створа	1	2	3	4
Наименование створа	СВС	ЮВС	ВВС	ГВС
Расстояние от впадения р. Ижоры, км	7	10	18	26
$Q = 4000 \text{ м}^3/\text{с}$				
$C'_{\text{макс}}$	3.37E-02	7.50E-03	6.84E-11	6.38E-15
$Q = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$				
$C'_{\text{макс}}$	5.71E-02	1.34E-02	1.26E-10	1.19E-14
$Q = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$				
$C'_{\text{макс}}$	1.42E-01	3.52E-02	3.40E-10	3.31E-14

В табл. 2 приведены рассчитанные значения максимальных по поперечному сечению реки концентраций консервативной примеси в створах расположения основных водозаборов, расположенных у левого берега Невы. Представленные данные подтверждают вывод о возрастании интенсивности перемешивания и снижении концентраций примеси при увеличении расходов воды в русле. Более детальная оценка попадания растворенной примеси в водозаборы ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» может быть сделана после уточнения их расположения по ширине русла и глубине.

Нетрудно видеть, что с увеличением расхода воды увеличивается зона распространения примеси по ширине р. Невы за счет возрастания коэффициента диффузии. В то же время снижаются максимальные значения содержания примеси у левого берега. Согласно выполненным расчетам, наибольшие концентрации примеси имеют место при минимальных расходах воды у левого берега.

4. Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить предположение о вдольбереговом распространении возможных загрязнений, поступающих в русло Невы со стоком боковых притоков и минимальных значениях поперечного перемешивания по сечению. С использованием методов математического моделирования удалось получить результаты, соответствующие данным натурных измерений. На настоящем этапе исследований можно говорить пока что только о качественном соответствии, поскольку

адекватные количественные оценки могут быть получены после учета в расчетах вклада источников, расположенных выше по течению — это реки Мга и Тосна, а также водовыпуск очистных сооружений пос. Металлострой. Получение количественных оценок соответствия результатов моделирования данным натурных измерений будет выполнено в ближайшей перспективе.

В дальнейших исследованиях разработанная в Институте озероведения РАН модель IL_MTRiver [27] может быть использована для решения задач оценки возможного загрязнения невиской воды в районе городских водозаборов и прогноза последствий возникновения аварийных ситуаций, связанных со сбросом загрязненных стоков, на близлежащих предприятиях, в том числе, и на полигоне Красный Бор.

5. Финансирование

Работа выполнена при финансовом обеспечении 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», а также проекта EnviTox — Environmental impacts of the Krasny Bor toxic waste landfill (ID: 7817009067).

Литература

1. Качество поверхностных вод Российской Федерации в 2010 г. Ежегодник / под ред. А.М. Никанорова. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2011. 572 с.
2. Качество поверхностных вод Российской Федерации в 2011 г. Ежегодник / под ред. А.М. Никанорова. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2012. 553 с.
3. Качество поверхностных вод Российской Федерации в 2012 г. Ежегодник / под ред. А.М. Никанорова. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2013. 555 с.
4. Качество поверхностных вод Российской Федерации в 2013 г. Ежегодник / под ред. А.М. Никанорова. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2014. 568 с.
5. Качество поверхностных вод Российской Федерации в 2014 г. Ежегодник / под ред. А.М. Никанорова. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2015. 530 с.
6. Качество поверхностных вод Российской Федерации в 2015 г. Ежегодник / под ред. А.М. Никанорова. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2016. 552 с.
7. Качество поверхностных вод Российской Федерации в 2016 г. Ежегодник / под ред. А.М. Никанорова. Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», 2017. 556 с.
8. Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 288 с.
9. Карасев И.Ф. Руслые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
10. Караушев А.В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 392 с.
11. Гришанин К.В. Динамика руслых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 428 с.
12. Маккавеев Н.И., Чалов Р.С. Руслые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 264 с.
13. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973. 792 с.
14. Ламб Г. Гидродинамика. М.: ОГИЗ, 1947. 930 с.
15. Kerstens P.J.M., van Rijn L.C. Model for non-steady suspended sediment transport // Project Engineers Delft hydraulics laboratory. Delft, Netherlands. 1977. 8 p.
16. Sanchez A., Wu W. A non-equilibrium sediment transport model for coastal inlets and navigation channels // Proceedings, Symposium to Honor Dr. Nicholas C. Kraus. Journal of Coastal Research. Special Issue. 2011. N59. P. 39–48.
17. Singh V. Two dimensional sediment transport model using parallel computers // B. Tech. Banaras Hindu University, India. 2002. 109 p.
18. Van Rijn L.C. Sedimentation of dredged channels by currents and waves // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 1986. V. 112, N5. P. 541–559.
19. Wu W. Computational River Dynamics. CRC Press. 2007. 509 p.
20. GeoniCS Каналы и реки (Aquaterra) 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/aquaterra/aquaterra-2013.html> (дата обращения: 10.08.2020).
21. DHI Group. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dhigroup.com> (дата обращения: 10.08.2020).
22. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69) / Gary W., Brunner. Version 4.1. January 2010. 411 p.
23. SOBEK Suite — Deltares. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deltares.nl/en/software/sobek/> (дата обращения: 10.08.2020).

24. Saiedi S. Coupled modeling of alluvial flows // J. Hydraulic Eng. ASCE. 1997. N123(5). P. 440–446.
25. Cao Z., Day R., Egashira S. Coupled and decoupled numerical modeling of flow and morphological evolution in alluvial rivers // J. Hydraulic Eng., ASCE. 2002. 128(3). P. 306–321.
26. Румянцев А.А., Кондратьев С.А., Поздняков Ш.П., Рыбакин В.Н., Крючков А.М., Моисеенков А.И., Шмакова М.В., Еришова А.А. Экспериментальные исследования и моделирование формирования качества воды в реке Нева // Известия РГО. 2010. Т. 142. С. 24–31.
27. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор — водоток — водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.
28. Чалов Р.С., Алексеевский Н.И., Лю Шугуан. Сток наносов и русловые процессы на больших реках России и Китая. М.: МГУ, 2000. 216 с.
29. Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 288 с.

References

1. Surface Water Quality of the Russian Federation in 2010. Yearbook / Ed. by A.M. Nikanorov. *Rostov-on-Don, FSYBI "HCI"*, 2011. 572 p. (in Russian).
2. Surface Water Quality of the Russian Federation in 2011. Yearbook / Ed. by A.M. Nikanorov. *Rostov-on-Don, FSYBI "HCI"*, 2012. 553 p. (in Russian).
3. Surface Water Quality of the Russian Federation in 2012. Yearbook / Ed. by A.M. Nikanorov. *Rostov-on-Don, FSYBI "HCI"*, 2013. 555 p. (in Russian).
4. Surface Water Quality of the Russian Federation in 2013. Yearbook / Ed. by A.M. Nikanorov. *Rostov-on-Don, FSYBI "HCI"*, 2014. 568 p. (in Russian).
5. Surface Water Quality of the Russian Federation in 2014. Yearbook / Ed. by A.M. Nikanorov. *Rostov-on-Don, FSYBI "HCI"*, 2015. 530 p. (in Russian).
6. Surface Water Quality of the Russian Federation in 2015. Yearbook / Ed. by A.M. Nikanorov. *Rostov-on-Don, FSYBI "HCI"*, 2016. 552 p. (in Russian).
7. Surface Water Quality of the Russian Federation in 2016. Yearbook / Ed. by A.M. Nikanorov. *Rostov-on-Don, FSYBI "HCI"*, 2017. 556 p. (in Russian).
8. Grushevski M.S. Unsteady water motion in rivers and channels. L., *Hydrometeoizdat*, 1982. 288 p. (in Russian).
9. Karasev I.F. Riverbed processes at the diversion of run-off. L., *Hydrometeoizdat*, 1975. 288 p. (in Russian).
10. Karashev A.V. Questions of the dynamics of natural water flows. L., *Hydrometeoizdat*, 1960. 392 p. (in Russian).
11. Grishanin K.V. Dynamics of stream flows. Leningrad, *Hydrometeoizdat*, 1969, 428 p. (in Russian).
12. Makkaveev N.I., Chalov R.S. Riverbed processes. Moscow, *MGU*, 1986, 264 p. (in Russian).
13. Betchelor Dj. Introduction to fluid dynamics. Moscow, *Mir*, 1973, 792 p. (in Russian).
14. Lamb G. Hydrodynamics. Moscow, *OGIZ*, 1947, 930 p. (in Russian).
15. 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.
16. Sanchez A., Wu W. A non-equilibrium sediment transport model for coastal inlets and navigation channels. *Proceedings, Symposium to Honor Dr. Nicholas C. Kraus. Journal of Coastal Research. Special Issue*. 2011, 59, 39–48.
17. Singh V. Two dimensional sediment transport model using parallel computers. B. Tech. *Banaras Hindu University, India*. 2002. 109 p.
18. Van Rijn L.C. Sedimentation of dredged channels by currents and waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 1986, 112, 5, 541–559.
19. Wu W. Computational River Dynamics. *CRC Press*. 2007. 509 p.
20. GeoniCS Channels and rivers (Aquaterra) 2013 [Electronic resource]. URL: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/aquaterra/aquaterra-2013.html> (date of access: 10.08.2020).
21. DHI Group [Electronic resource]. URL: <http://www.dhigroup.com> (date of access: 10.08.2020) (in Russian).
22. HEC-RAS, River Analysis System: *Hydraulic Reference Manual (CPD-69)* / Gary W., Brunner. Version 4.1. January 2010. 411 p.
23. SOBEK Suite — Deltares. [Electronic resource]. URL: <https://www.deltares.nl/en/software/sobek/> (date of access: 10.08.2020).
24. Saiedi S. Coupled modeling of alluvial flows. *J. Hydraulic Eng. ASCE*. 1997, 123(5), 440–446.
25. Cao Z., Day R., Egashira S. Coupled and decoupled numerical modeling of flow and morphological evolution in alluvial rivers. *J. Hydraulic Eng., ASCE*. 2002, 128(3), 306–321.

26. Rumyantsev A.A., Kondrat'ev S.A., Pozdnyakov S.H.R., Rybakin V.N., Kryuchkov A.M., Moiseenkov A.I., Shmakova M.V., Ershova A.A. Experimental studies and modeling of water quality formation in the Neva river. *Izvestiya RGO*. 2010, 142, 24–31 (in Russian).
27. Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. Mathematical modeling of mass transfer in the catchment —stream flow — reservoir system. *SPb., Nestor-Istoriya*, 2019. 246 p. (in Russian).
28. Chalov R.S., Alekseevskij N.I., Lyu S.Huguan. Sediment runoff and riverbed processes on large rivers in Russia and China. *M., MGU*, 2000. 216 p. (in Russian).
29. Methodological bases for assessing and regulating anthropogenic impact on surface water quality. *L., Hydrometeoizdat*, 1987. 288 p. (in Russian).

К статье *Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Игнатьева Н.В., Иванова Е.В., Гузиватый В.В.* Экспериментальные и модельные исследования распространения вод реки Ижоры в русле реки Невы
Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Ignatieva N.V., Ivanova E.V., Guzivaty V.V. Experimental and model studies of the Izhora River waters spreading in the Neva River

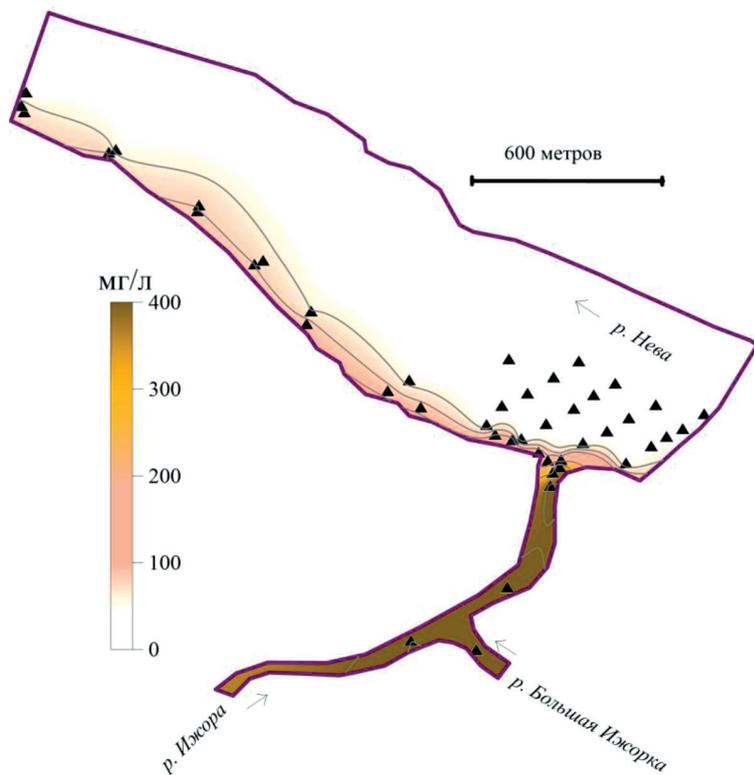


Рис. 2. Результаты натурального эксперимента по оценке общей минерализации в зоне смешения вод рек Ижоры и Невы 14.07.2019 (▲ — точки измерений).

Fig. 2. Results of a full-scale experiment to assess the total mineralization in the mixing zone of the waters of the Rivers Izhora and Neva 07/14/2019 (▲ — measurement points).

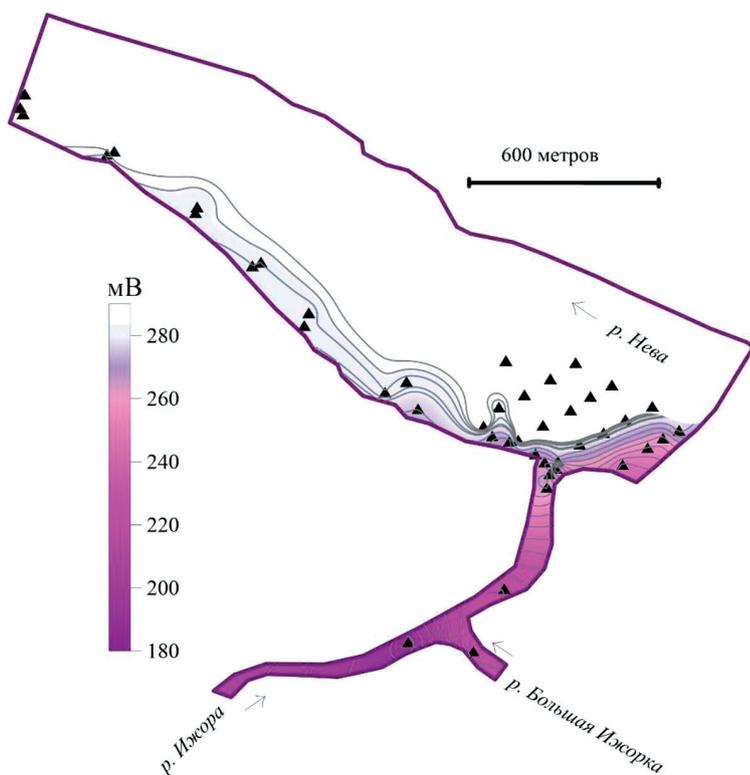


Рис. 3. Результаты натурального эксперимента по оценке окислительно-восстановительного потенциала в зоне смешения вод рек Ижоры и Невы 14.07.2019 (▲ — точки измерений).

Fig. 3. Results of a full-scale experiment to assess the redox potential in the mixing zone of the waters of the Rivers Izhora and Neva 07/14/2019 (▲ — measurement points).

К статье *Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Игнатьева Н.В., Иванова Е.В., Гузиватый В.В.* Экспериментальные и модельные исследования распространения вод реки Ижоры в русле реки Невы
Kondratyev S.A., Shmakova M.V., Ignatieva N.V., Ivanova E.V., Guzivaty V.V. Experimental and model studies of the Izhora River waters spreading in the Neva River

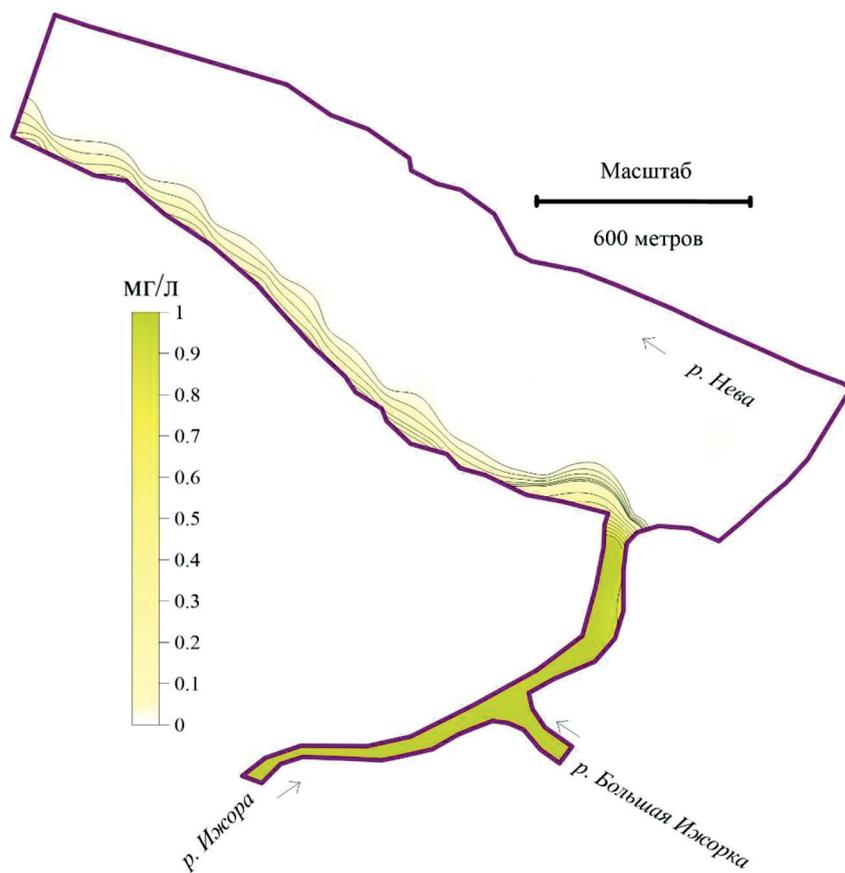


Рис. 4. Результаты расчета распространения примеси, поступившей в Неву со стоком Ижоры.

Fig. 4. Results of calculating the impurities spreading that inflow the Neva with the Izhora runoff.