



Никуленков А.М.¹, Еремин Г.Б.², Степайкина П.В.¹, Борисова Д.С.^{2,3},
Мозжухина Н.А.³, Исаев Д.С.²

Подходы к обоснованию размещения промышленных объектов в пределах поясов зон санитарной охраны поверхностных водотоков

¹Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН имени Е.М. Сергеева, 199004, Санкт-Петербург, Россия;

²ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья», 191036, Санкт-Петербург, Россия;

³ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова», 191015, Санкт-Петербург, Россия

РЕЗЮМЕ

Введение. В статье рассматривается подход к обоснованию границ ЗСО поверхностных водотоков без вывода производственных объектов в пределах установленных поясов, основанный на оценке воздействия на качество воды в точке водозабора при штатной эксплуатации объекта, а также проектных и запроектных аварийных сбросах от предприятия.

Материалы и методы. Нормативные правовые акты, регулирующие отношения в сфере проектирования и установления зон санитарной охраны (ЗСО), данные фактических наблюдений за рассеиванием сбросов в крупных реках, оригинальные статьи, представленные в базах данных и информационных системах РИНЦ, КиберЛенинка, Scopus, Web of Science. Методологическую основу для обоснования воздействия составили геомиграционные аналитические расчёты разбавления линейного источника в потоке.

Результаты. Показано, что при точечном (локальном) сбросе в реку формируется ореол рассеивания. Из-за особенностей дисперсионных процессов на противоположном берегу реки вниз по потоку от сброса может формироваться область акватории (полоса), на которую не распространяется техногенное воздействие, или же это воздействие пренебрежимо мало. Это допускает одновременную безопасную эксплуатацию питьевого водозабора и промышленного объекта, расположенного в границах поясов ЗСО питьевого водозабора.

Ограничения исследования. В настоящей статье изложена методика аналитических расчётов разбавления стоков в речных водах. Приведённые решения имеют ряд ограничений. В частности, они предполагают, что ширина русла реки и её профиль постоянны, сброс загрязнённых сточных вод стационарен, потери и боковой приток воды отсутствуют, перемешивание происходит одновременно по всей глубине реки. Также не учитываются взаимодействие со взвесью и влияние ветровой нагрузки на деформацию ореола загрязнения вблизи поверхности. Если любая из вышеобозначенных предпосылок не выполняется на реальном объекте, то следует обратиться к более сложным расчётам на численных моделях.

Заключение. Применение описанных в статье подходов позволяет провести обоснование сохранения промышленных объектов в пределах поясов ЗСО поверхностных водотоков.

Ключевые слова: зона санитарной охраны (ЗСО); береговой водозабор; обоснование размещения промышленного объекта в границах ЗСО; гидродинамические расчёты; разбавление стоков в речных водах

Соблюдение этических стандартов. Заключение этического комитета не требуется.

Для цитирования: Никуленков А.М., Еремин Г.Б., Степайкина П.В., Борисова Д.С., Мозжухина Н.А., Исаев Д.С. Подходы к обоснованию размещения промышленных объектов в пределах поясов зон санитарной охраны поверхностных водотоков. *Гигиена и санитария*. 2024; 103(8): 814–821. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-8-814-821> <https://elibrary.ru/jmkwob>

Для корреспонденции: Еремин Геннадий Борисович, канд. мед. наук, зав. отд. гигиены ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья». E-mail: yeremin45@yandex.ru

Участие авторов: Никуленков А.М. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материалов, написание текста; Еремин Г.Б. – концепция и дизайн исследования, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи; Степайкина П.В. – концепция и дизайн исследования, сбор и обработка материалов, редактирование; Борисова Д.С. – сбор и обработка материалов, редактирование; Мозжухина Н.А. – написание текста, редактирование; Исаев Д.С. – редактирование.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 03.05.2024 / Принята к печати: 2024 / Опубликовано: 10.09.2024

Anton M. Nikulenkov¹, Gennadiy B. Yeremin², Polina V. Stepaikina¹, Darya S. Borisova^{2,3},
Natalya A. Mozzhukhina³, Daniil S. Isaev²

Approaches to substantiating the placement of industrial facilities within the sanitary protection zones of surface watercourses

¹Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, 199004, Russian Federation;

²North-West Public Health Research Center, 191036, St.-Petersburg, 191036, Russian Federation;

³North-West State Medical University named after I.I. Mechnikov, St.-Petersburg, 191015, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article considers an approach to be used to delineate the source water protection area for the surface water bodies without putting manufacturing plants within the delineated areas out of action. The approach is based on the assessment of the disposals produced by plants on the water quality at the surface water intake point during the plant's accident-free operation and both accidents within and beyond the design basis.

Materials and methods. The article used the water protection area laws and regulations, the data observed of the disposal dispersion in the large rivers, and the original articles presented in databases and information systems: RSCI, CyberLeninka, Scopus, Web of Science. The solute transport analytical solutions for the dilution of the linear source in the flow serve as the methodological framework.

Results. The article results have shown the local disposal into the river to form dispersion halo. Due to the specific dispersion processes, an area of a strip-like shape on the opposite shore can be formed where an anthropogenic influence is not present or negligible. This can be considered the background for the safe cooperative operation of the water intake and a manufacturing plant located within the water protection area.

Limitations. The present article outlines the analytical approach for estimating the dilution of wastewater in river waters. The methodologies proposed are subject to several constraints, including the assumption of a constant river channel width and profile, steady discharge of contaminated wastewater, absence of water inflow losses or replenishment, lack of interaction with suspended particulate matter, uniform mixing across all segments of the river, and neglect of wind-induced effects on pollutant dispersion near the water surface. Failure to meet any of these assumptions necessitates recourse to more sophisticated numerical modelling techniques for accurate calculation.

Conclusion. The use of the approach presented in the paper allows justifying the manufacturing plant's operation within the source water protection area for the surface water bodies.

Keywords: source water protection area (SWPA) for the surface water; coastal water intake; justification of the manufacturing plant's operation within the SWPA; hydrodynamic calculation; dilution of effluents in stream waters

Compliance with ethical standards. The opinion of the ethics committee is not required.

For citation: Nikulenkov A.M., Yeremin G.B., Stepaikina P.V., Borisova D.S., Mozhukhina N.A., Isaev D.S. Approaches to substantiating the placement of industrial facilities within the sanitary protection zones of surface watercourses. *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal.* 2024; 103(8): 814–821. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-8-814-821> <https://elibrary.ru/jmkwob> (In Russ.)

For correspondence: Gennadiy B. Yeremin, MD, PhD, Honoured Doctor of the Russian Federation, leading researcher, head of the Hygiene Department, Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199004, Russian Federation. E-mail: yeremin45@yandex.ru

Contribution: *Nikulenkov A.M.* – the concept and design of the study, collection and processing of materials, writing the text; *Yeremin G.B.* – the concept and design of the study, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article; *Stepaikina P.V.* – the concept and design of the study, collection and processing of materials, editing; *Borisova D.S.* – collection and processing of materials, editing; *Mozhukhina N.A.* – writing the text, editing; *Isaev D.S.* – editing.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: May 3, 2024 // Accepted: June 19, 2024 / Published: September 10, 2024

Введение

В соответствии с СанПиН 2.1.3684–21¹ для сохранения природного состава и качества поверхностных и подземных вод должны предусматриваться зоны санитарной охраны (ЗСО). Подземные воды в отличие от поверхностных по своей природе лучше защищены от загрязнения, поэтому размеры ЗСО подземных источников водоснабжения значительно меньше по площади, чем ЗСО водозаборов поверхностных вод. В структуре хозяйственно-питьевого водоснабжения Российской Федерации доля потребления поверхностных вод в среднем больше, чем подземных [1]. Особенности потребления воды в нашей стране и требования санитарного законодательства предопределили ограничения, которые накладываются на обширные территории вдоль поверхностных водотоков для поддержания качества природных вод и могут в значительной степени сдерживать хозяйственную деятельность. Отвод земельных участков под размещение промышленных объектов, расположенных в границах ЗСО вверх по течению реки, в настоящее время не регулируется санитарным законодательством, в то время как вывод или сохранение промышленных и сельскохозяйственных объектов ниже по течению реки в границах 2-го и 3-го поясов ЗСО, оценка надёжности имеющихся водозаборов и условий их размещения находятся в центре внимания.

В настоящей статье рассматриваются некоторые подходы к обоснованию ЗСО без вывода производственных объектов из границ установленных поясов зон санитарной охраны поверхностных водотоков, основанные на оценке воздействия на качество воды в точке водозабора сбросов предприятия при штатной эксплуатации объекта, проектных и запроектных аварийных сбросах².

¹ СанПиН 2.1.3684–21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».

² Авария запроектная – авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами систем безопасности, исключая единственный отказ, реализацией ошибочных решений персонала, которые могут привести к тяжёлым последствиям. – Терминология МЧС. <https://mchs.gov.ru/terminy-mchs-rossii>term>

Материалы и методы

Для обоснования допустимого воздействия сбросов проектируемого предприятия на водозабор поверхностных вод необходимо охарактеризовать интенсивность источника потенциального воздействия, а также провести расчёт степени разбавления загрязнения в водотоке. Если сброс стоков промышленного объекта не приведёт к изменению качества поверхностных вод в точке водозабора или это воздействие будет незначительным и показатели качества поверхностных вод не превысят ПДК с учётом фоновых значений), то промышленный или сельскохозяйственный объект может размещаться в пределах границ ЗСО поверхностного водотока.

Источники загрязнения. Современные требования российского законодательства обязывают при проектировании и строительстве промышленных объектов использовать риск-ориентированный подход для оценки возможного воздействия на окружающую среду³. При оценке воздействия на качество воды водоисточника промышленного предприятия, находящегося в границах поясов ЗСО водозабора, важно рассмотреть не только режим нормальной эксплуатации объекта, но и возможность возникновения проектных и запроектных аварийных ситуаций. Должны быть разработаны соответствующие этим случаям сценарии, обоснованы объёмы и концентрации загрязняющих компонентов, а также продолжительность поступления сбросов в окружающую среду для каждого из сценариев. Например, для горно-обогатительных комбинатов целесообразно рассматривать выход из строя системы очистки сточных вод как проектную аварию, а разрушение дамбы шламохранилища – как запроектную. Кроме того, при обосновании сохранения объекта в границах поясов ЗСО необходимо учитывать фоновые значения качества природных вод и общее воздействие от других существующих сбросов, влияющих на качество воды водозабора.

Рассеивание стоков в речных водах. При сбросе в речную воду стоков происходит их рассеивание. Обычно рассматривают три стадии этого процесса (рис. 1) [2, 3].

На первой стадии происходит первоначально разбавление источника. Степень разбавления и форма ореола загрязнения зависят от целого ряда факторов: конструкции водо-

³ Приказ Минприроды России от 01.12.2020 г. № 999 «Об утверждении требований к материалам оценки воздействия на окружающую среду», п. 7.4.

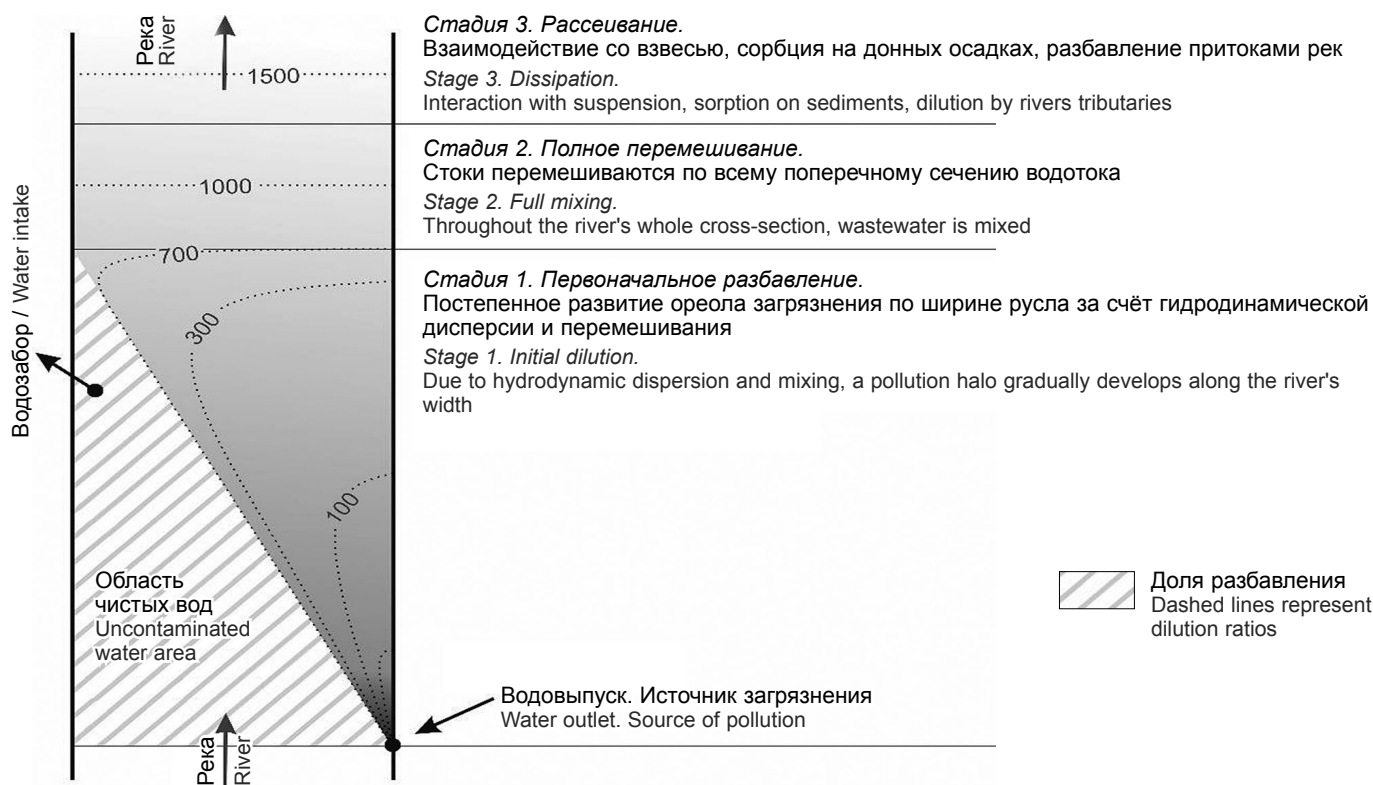


Рис. 1. Стадии рассеивания стоков в речных водах.

Fig. 1. Stages of wastewater dispersion in river waters.

выпуска, температуры сбросной жидкости, скорости реки, коэффициента поперечной турбулентной дисперсии, морфологии дна и т. д. На первой стадии наблюдается значительное разбавление стоков с кратностью от 10 до 1000 раз. При этом важно отметить характерную особенность первой стадии разбавления – это постепенное увеличение площади ореола рассеивания вниз по течению от точки сброса. Таким образом, даже ниже по потоку от сброса остаются области акватории, которые не подвержены техногенному воздействию (см. рис. 1).

Вторая стадия характеризуется полным перемешиванием стоков по всему поперечному сечению реки. Длина участка реки, где проявляется вторая стадия рассеивания, может достигать десятков километров.

На третьей стадии происходит ещё большее рассеивание загрязняющих веществ за счёт природных процессов, которые проявляются со временем. Например, на третьей стадии значимую роль в уменьшении концентраций загрязняющих компонентов в речной воде начинают играть сорбция тяжёлых металлов на взвеси, обмен с донными отложениями, биологическая деструкция, а также разбавление впадающими притоками рек и разгрузка подземных вод.

Рассмотрим подробнее особенности расчёта разбавления стоков для участков реки, удалённых на различные расстояния от источника загрязнения, то есть для трёх характерных стадий рассеивания.

Как отмечено выше, в ближней от сброса зоне (стадия 1) развивается ореол загрязнения. Требуется определённое расстояние (иногда десятки километров), чтобы ореол загрязнения смешался со всем объёмом речных вод, а его следы начали фиксироваться по всему сечению русла реки. Таким образом, в определённой области на противоположном берегу от источника сбросов ниже по потоку будет сохраняться область чистых вод, не подверженная техногенному воздействию сброса. Размещение в этой области поверхностного водозабора не приведёт к ухудшению качества воды даже при его расположении ниже по течению от сброса. Про-

тяжённость этой зоны по противоположному берегу может быть приближённо оценена по уравнению (1):

$$L = \frac{B^2 \bar{u}}{32E_y}, \quad (1)$$

где L – длина зоны чистых вод (отсчитывается по противоположному берегу вниз по потоку от точки сброса), м; B – ширина реки, м; \bar{u} – средняя скорость, м/с; E_y – коэффициент поперечной турбулентной дисперсии, м²/с.

Величина коэффициента поперечной турбулентной дисперсии может быть определена полевыми методами или оценена по следующей зависимости (2) [4]:

$$E_y = \alpha H u_* \approx \alpha H \bar{u}, \quad (2)$$

где H – средняя глубина реки, м; u_* – скорость трения у дна, м/с; \bar{u} – средняя скорость реки, м/с; α – коэффициент пропорциональности, зависящий от морфометрических характеристик, для малых рек и каналов находится в диапазоне от 0,1 до 0,2, а для средних и больших рек – от 0,6 до 2.

Натурные наблюдения за характером разбавления точечных сбросов на крупных реках свидетельствуют о том, что ореол загрязнения склонен группироваться вдоль ближайшего берега и в такой конфигурации распространяться на десятки километров вниз по течению от сброса, не затрагивая противоположной части реки. На рис. 2 приведены данные наблюдений за процессом разбавления сбросов на примере р. Камы (Пермский край) и р. Енисей (Красноярский край).

В Каме сброс на левом берегу был обусловлен поступлением солёных дренажных вод от горнодобывающих предприятий региона через р. Усолку. Распределение минерализации воды исследовали в трёх створах ниже по течению от сброса. Поля распределения минерализации по всей акватории реки воссозданы путём численного моделирования с последующей калибровкой по створам. Как видно из рис. 2, правый берег реки не подвержен воздействию источника загрязнений примерно на протяжении 12 км вниз по течению от источника. Примерно через 23 км в районе створа 3 про-

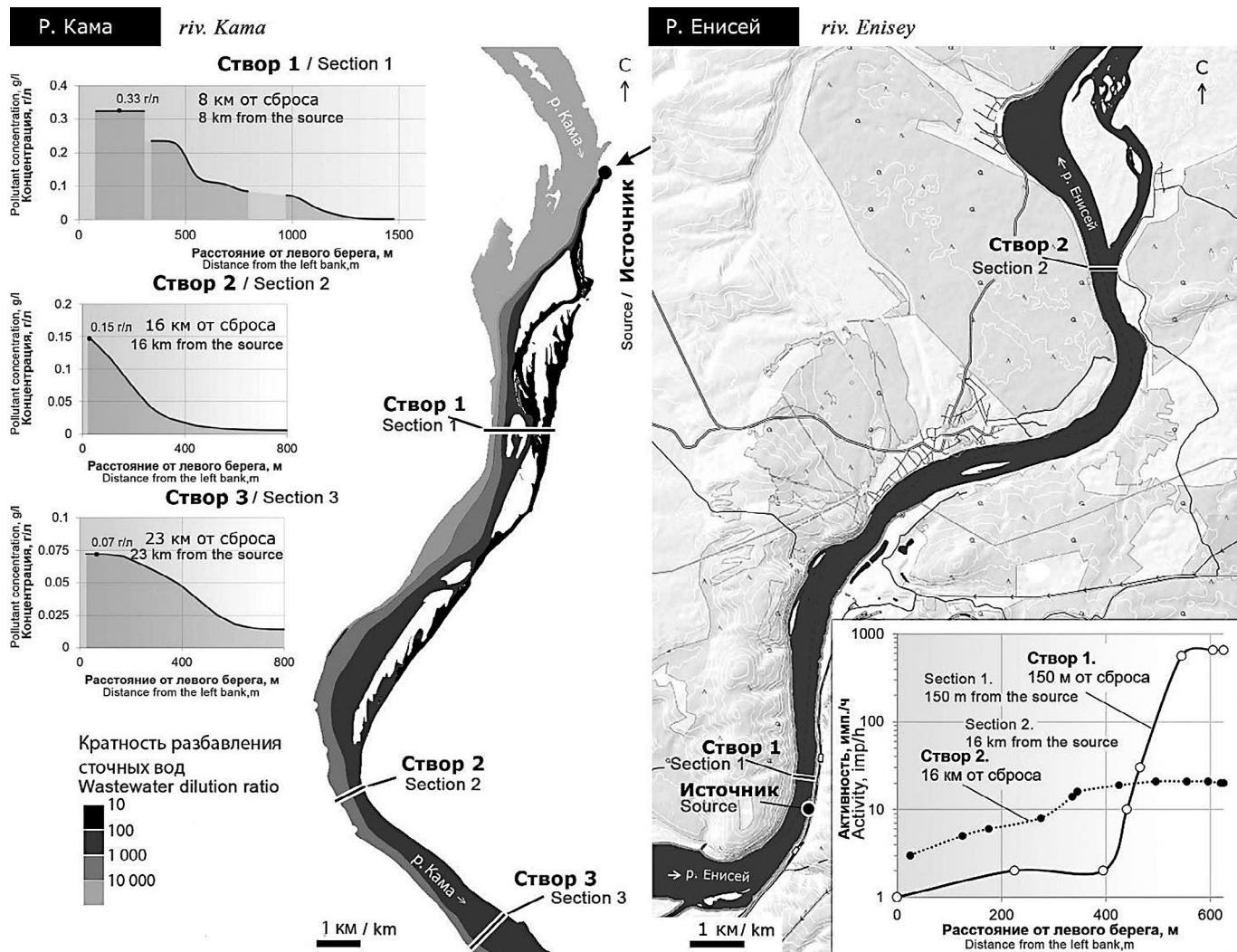


Рис. 2. Формирование ореолов рассеивания от сбросов на крупных реках.

Fig. 2. Formation of dispersion halos from waste outflows on large rivers.

исходит полное смешение сбросных и речных вод по всему поперечному сечению реки (переход на 2-ю стадию рассеивания).

В Енисее сброс радиоактивных стоков на правом берегу был обусловлен работой прямоточных реакторов Красноярского горно-химического комбината (ГХК) [5]. Ниже по потоку Енисея были заложены два створа на расстоянии 150 м и 16 км от источника. Радиоактивность в верхнем слое речной воды измеряли погружным радиометром СРП-68-02 на глубине 1 м. Результаты замеров по профилям приведены на рис. 2 [5]. Из рис. 2 видно, что даже на расстоянии 16 км от источника не произошло полного разбавления вод и, как следствие, вдоль правого берега Енисея радиоактивность речной воды примерно в 10 раз выше, чем вдоль левого.

Численные и аналитические методы позволяют оконтурить область распространения чистых вод и рассчитать разбавление стоков в речной воде в зависимости от сложности природных условий и процессов, которые необходимо учитывать [6, 7]. Для упрощённых экспертных оценок разбавления, как правило, используют аналитическое уравнение (3), рекомендованное МАГАТЭ [4].

Аналитическое уравнение (3) может применяться для расчёта установившейся концентрации загрязняющих компонентов в воде реки ниже точки стационарного линейного источника сброса. Модель обладает рядом допущений, в частности:

- ширина русла и его профиль постоянны;
- сброс загрязнённых сточных вод стационарен;

- шлейф загрязнённой воды ниже сброса стационарен;
- потери и боковой приток воды отсутствуют;
- взаимодействие со взвесью не учитывается.

$$C(x, y) = \frac{W}{Q} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 x E_y}{u B^2}\right) \frac{\sin n \delta}{n \delta} \cos \frac{n \pi y}{B} \times \cos \frac{n \pi}{2} \left(\frac{y_{s1} + y_{s2}}{B}\right) \right] e^{-\frac{\lambda x}{u}} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\pi}{2} \left(\frac{q_{s2} - q_{s1}}{Q} \right),$$

где $C(x, y)$ – концентрация загрязняющего вещества в речной воде в точке (x, y) , $\text{кг}/\text{м}^3$; x – координата вдоль реки, м; y – координата поперёк реки, м; W – интенсивность источника, $\text{кг}/\text{с}$; Q – расход реки, $\text{м}^3/\text{с}$; E_y – поперечная дисперсия, $\text{м}^2/\text{с}$; u – средняя скорость, $\text{м}/\text{с}$; B – ширина реки, м; q_{s2} и q_{s1} – расход реки в створе от берега до дальнего края (y_{s2}) линейного источника и до ближнего края (y_{s1}) линейного источника, соответственно, $\text{м}^3/\text{с}$; λ – константа скорости распада, с^{-1} .

Для зоны полного смешения (стадия 2) справедливо упростить выражение (3) до следующего:

$$C_{avg} = \frac{W}{Q}, \quad (4)$$

где C_{avg} – средняя концентрация загрязняющего компонента в речной воде, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Рекомендуемые камерные модели позволяют учесть механизмы природной реабилитации речных вод при загряз-

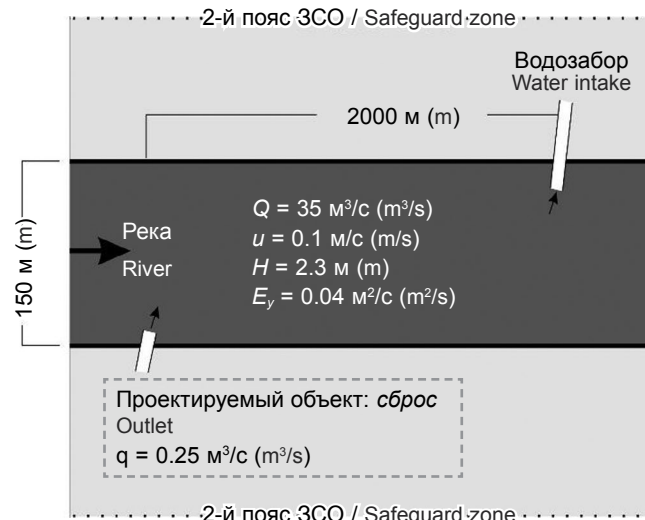


Рис. 3. Схема к расчёту потенциального воздействия сооружения, проектируемого у реки, на качество воды поверхностного водозабора.

Fig. 3. Scheme for calculating the potential impact of the manufacturing plant's operation near a river on the water quality of surface water intake.

нении стоками на участках рек, удалённых непосредственно от источника сброса (стадия 3). Камерные модели могут описывать взаимодействие и обмен вещества между водной массой, взвесью, донными отложениями, процессами биологической деструкции и т. д. Подробно камерные модели описаны в [6, 8–10].

Результаты

Рассмотрим применение вышеописанной методики на конкретном примере. На правом берегу реки размещён промышленный объект. В результате деятельности предприятия формируются жидкие стоки, которые отводятся в поверхностный водоток после водоподготовки на очистных сооружениях. В двух километрах ниже по течению от проектируемого объекта на противоположном берегу располагается водозабор питьевых вод (рис. 3). Предприятие попадает в границы 2-го пояса ЗСО поверхностного водотока. Проведём обоснование потенциального воздействия проектируемого сооружения на качество поверхностных вод в точке расположения водозабора.

Обоснование источника загрязнения. Типовые стоки проектируемого предприятия могут быть представлены повышенными значениями нитратов (NO_3^-) и трития (^3H). Расчётный объём стоков составляет $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$. При штатной работе предусмотрена очистка стоков до показателей, удовлетворяющих санитарным и рыбохозяйственным нормативным требованиям. Очевидно, что при штатной эксплуатации негативного воздействия объекта на качество воды поверхностного водозабора не будет.

Однако, следуя риск-ориентированному подходу, рассмотрим сценарии нештатной работы предприятия. В случае проектной аварии будем предполагать выход из строя очистных сооружений. Тогда в сбросных водах будут отмечаться нитраты с превышением в 10 ПДК. Катастрофический сценарий предполагает нарушение производственных процессов на предприятии в результате внешнего физического воздействия. В таком случае в сточных водах можно ожидать превышение содержания нитратов и трития до 100 ПДК. Концентрации загрязняющих веществ при разных сценариях эксплуатации проектируемого сооружения приведены в табл. 1.

Средний расход сбросных вод составляет $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$. Интенсивность (массовый расход) источника может быть получена путём умножения расхода источника на концентрацию загрязняющего компонента. В табл. 2 приведена расчётная

Таблица 1 / Table 1

Характеристика сбрасываемых сточных вод при различных сценариях

Characteristics of discharged wastewater under various scenarios

Загрязнитель Pollutant	Режим эксплуатации Operating mode (Scenario)			ПДК Maximum permissible concentration
	Нормальная Accident-free operation	Проектная авария Accidents within the design basis	Запроектная авария Accidents beyond the design basis	
NO_3^- , мг/л (mg/L)	4.5	450	4500	45
^3H , Бк/кг (Bq/kg)	760	760	760 000	7600*

Примечание. Здесь и в табл. 4: * – уровень вмешательства согласно НРБ 99/2009.

Note: Here and in Table 4: * – level of intervention according to Radiation safety standards 99/2009.

Таблица 2 / Table 2

Расчётная интенсивность (W) источника

Mass loading rate of source (W)

Загрязнитель Pollutant	Режим эксплуатации Operating mode (Scenario)		
	Нормальная Accident-free operation	Проектная авария Accidents within the design basis	Запроектная авария Accidents beyond the design basis
NO_3^- , мг/с (mg/s)	1125	112 500	$1.13 \cdot 10^6$
^3H , Бк/с (Bq/s)	190 000	190 000	$1.9 \cdot 10^8$

интенсивность источника для разных сценариев эксплуатации проектируемого объекта.

Обоснование параметров расчёта. В расчётах разбавления был использован расход реки с 95%-й обеспеченностью ($35 \text{ м}^3/\text{с}$), который характерен для периода межени. Маленькие расходы реки сокращают степень разбавления стоков, что обуславливает более консервативные оценки потенциального негативного воздействия от сбросов. Ширина реки составляет 150 м, скорость воды 0,1 м/с, средняя глубина реки 2,3 м.

Для определения коэффициента поперечной турбулентной дисперсии был использован космический снимок участка реки недалеко от места строительства. На снимке прослеживается область мутных вод вдоль правого берега, которая сформировалась за счёт впадения в основную реку притока с загрязнённой водой (рис. 4). Величину турбулентной дис-

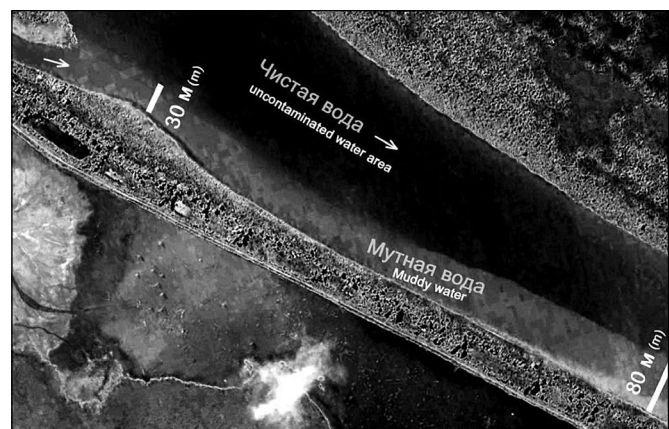


Рис. 4. Космический снимок участка реки с увеличенным контрастом.

Fig. 4. Space image of a river site with enhanced contrast.

Таблица 3 / Table 3

Параметры, использованные для расчёта разбавления стоков

Parameters used to calculate waste water dilution

Параметр Parameters	Значения Values	Комментарии Comments
Интенсивность источника (<i>W</i>), мг/с Mass loading rate of source (<i>W</i>), mg/s	См. табл. 2 See Table 2	Интенсивность источника рассчитывается путём умножения расхода сброса на концентрацию загрязняющего вещества Mass loading rate is calculated by multiplying the river flow by the pollutant concentration
Расход реки (<i>Q</i>), м ³ /с River flow rate (<i>Q</i>), m ³ /s	35	Рассчитан меженный расход 95% обеспеченности Calculated river flow rate of 95% exceedance probability
Средняя скорость (<i>ū</i>), м/с Average velocity (<i>ū</i>), m/s	0.1	Средняя скорость по руслу на период межени Average velocity along the riverbed during the low-water period
Ширина реки (<i>B</i>), м River width (<i>B</i>), m	150	Ширина на период межени Width during low water period
Коэффициент поперечной турбулентной дисперсии (<i>E_y</i>), м ² /с Transverse turbulent dispersion coefficient (<i>E_y</i>), m ² /s	0.04	Рассчитан на основании ореола рассеивания на космическом снимке по уравнению (5) Calculated based on the halo on a space image using equation (5)
Константа распада (<i>λ</i>), с ⁻¹ : Decay constant (<i>λ</i>), s ⁻¹ :		
для (for) NO ₃ ⁻	0	—
для (for) ³ H	1,78 · 10 ⁻⁹	
Ширина рассеянного водовыпуска в реке (<i>y_{s1}</i> , <i>y_{s2}</i>), м Width of scattered outlet in the river (<i>y_{s1}</i> , <i>y_{s2}</i>), m	0 1	<i>y_{s1}</i> – расстояние от правого берега до ближнего края линейного источника (0 – прямо на берегу); <i>y_{s2}</i> – расстояние от правого берега до дальнего края линейного источника; общая длина водовыпуска составила 1 м <i>y_{s1}</i> – distance from the right bank to the near edge of the linear source (0 – right on the bank); <i>y_{s2}</i> – distance from the right bank to the far edge of the linear source. The total length of the water outlet was 1 m
Расход основной реки через сечение водовыпуска (<i>q_{s1}</i> , <i>q_{s2}</i>), м ³ /с Duty of water through the water outlet section (<i>q_{s1}</i> , <i>q_{s2}</i>), m ³ /s	0 0.25	<i>q_{s1}</i> – расход реки по ленте шириной от правого берега до ближнего края водовыпуска (0 – прямо на берегу); <i>q_{s2}</i> – расход реки по ленте шириной от правого берега до дальнего края водовыпуска: 0.25 м ³ /с = (скорость 0.1 м/с) · (глубина реки 2.5 м · <i>y_{s2}</i>) <i>q_{s1}</i> – duty of water along a ribbon wide from the right bank to the near edge of the outlet (0 – right on the bank); <i>q_{s2}</i> – river flow along a ribbon wide from the right bank to the far edge of the outlet (0.25 m ³ /s = speed 0.1 m/s · river depth 2.5 m · <i>y_{s2}</i>)
Система координат (<i>x</i> ; <i>y</i>), м Coordinate system, (x; y), m	—	Ось OX направлена вниз по течению реки от источника, ось OY ориентирована поперёк реки The OX axis is directed downstream of the river from the source, the OY axis is oriented across the river

персии можно рассчитать по ширине области мутных вод в двух поперечных створах реки, используя выражение (5):

$$E_y = \frac{(L_2^2 - L_1^2) \cdot \bar{u}}{32(X_2 - X_1)}, \quad (5)$$

где *L_{1,2}* – поперечная ширина ореола загрязнения в точках 1 и 2, соответственно, м; *ū* – средняя скорость потока, м/с; *X₂–X₁* – расстояние между створами (точками 1 и 2), м.

В расчёте принято, что средняя скорость воды составляет 0,1 м/с, расстояние между двумя створами (*X₂–X₁*) составляет 440 м, ширина ореола мутной воды составляет 80 и 30 м для нижнего и верхнего створов соответственно. В таком случае коэффициент поперечной турбулентной дисперсии (*E_y*) будет равен 0,04 м²/с.

Для расчёта разбавления применяли уравнение (3). И использованные значения параметров приведены в табл. 3.

Принятые допущения и предположения в расчёте:

- расход реки и расход сброса постоянны;
- интенсивность источника постоянна;
- фоновые концентрации нитратов и трития в речной воде стремятся к нулю;
- скорость потока и глубина реки не меняются в пределах рассматриваемой акватории;
- перемешивание происходит равномерно по всей глубине реки;
- погодные условия не влияют на контур ореола рассеивания.

Результаты расчёта рассеивания сбросных вод. Оценка изменения качества воды речного водозабора при осуществлении сброса в пределах границ 2-го пояса ЗСО была проведена для трёх сценариев эксплуатации предприятия: штатный режим работы, проектная и запроектная аварии. Обобщённые результаты расчётов приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что сброс с предприятия, расположенного в 2 км выше по потоку реки (на противоположном берегу), не приведёт к значимому изменению качества воды водозабора. Максимального воздействия можно ожидать при потенциальной запроектной аварии, когда в сбросах будут присутствовать повышенные концентрации нитратов и трития. Тем не менее даже при запроектной аварии, согласно расчётам, в точке водозабора не будут нарушены санитарно-гигиенические требования к качеству воды.

Таблица 4 / Table 4

Расчётные концентрации загрязнителей в точке забора речной воды (2000 м вниз по потоку на противоположном берегу от сброса) при различных сценариях эксплуатации проектируемого объекта

Calculated pollution concentrations at the point of river water intake (2000 m downstream on the opposite bank from the discharge) under various operating scenarios of the designed facility

Загрязнитель Pollutant	Режим эксплуатации Operating mode (Scenario)			ПДК Maximum permissible concentration
	Нормальная Accident-free operation	Проектная авария Accidents within the design basis	Запроектная авария Accidents beyond the design basis	
NO ₃ ⁻ , мг/л (mg/L)	0	0.02	0.17	45
³ H, Бк/кг (Bq/kg)	0.03	0.03	28.8	7600*

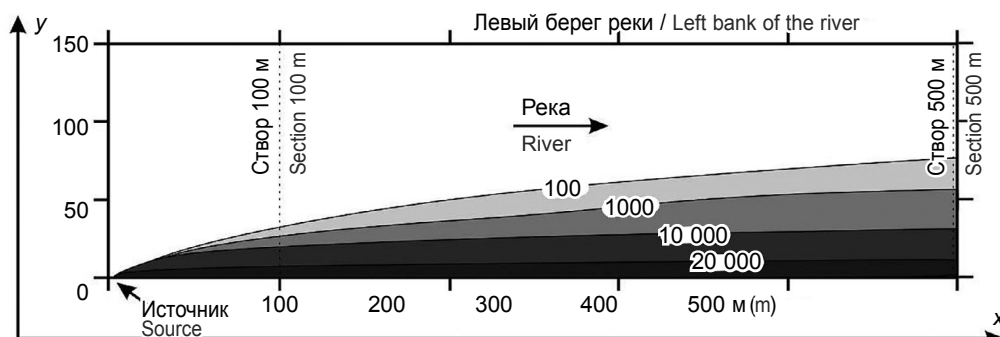


Рис. 5. Расчётный ореол рассеивания ^3H в реке для сценария запроектного режима эксплуатации. Числа на изолиниях – объёмная активность трития в Бк/л.

Fig. 5. Calculated a ^3H dispersion halo in the river for an accident scenario operation mode. Numbers on the isolines – volumetric activity of tritium in Bq/L.

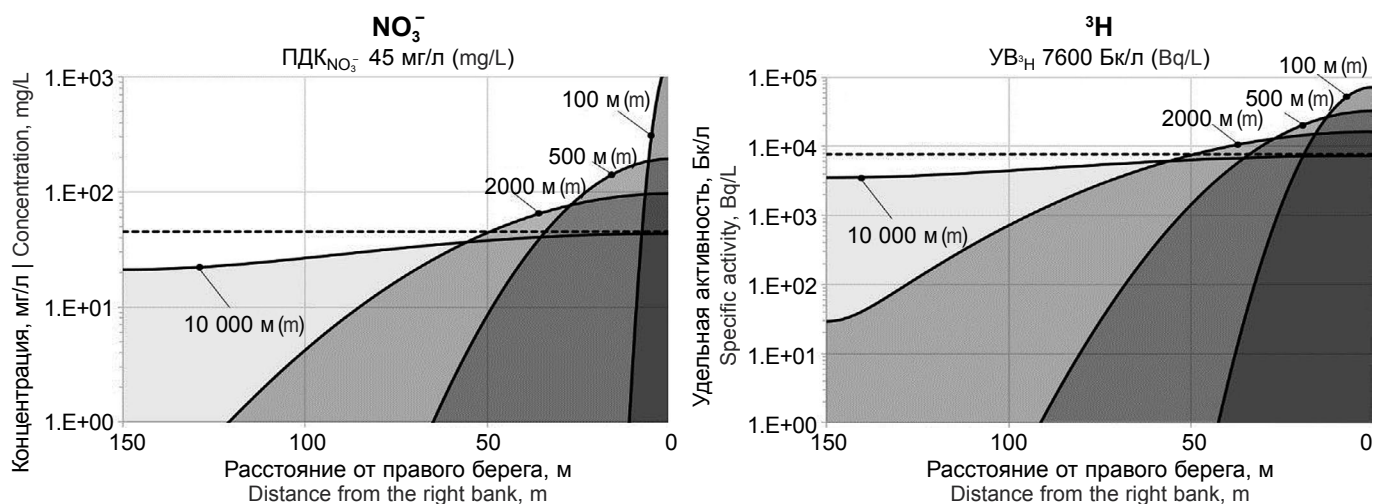


Рис. 6. Расчётные концентрации нитратов и трития в речной воде для случая запроектной аварии, полученные в контрольных створах, удалённых вниз по течению от источника сброса на 100; 500; 2000 и 10 000 м.

Fig. 6. Calculated nitrates and tritium concentrations in river water for the case of a beyond design basis accident, obtained at control sections located 100; 500; 2000 and 10 000 meters downstream from the wastewater discharge.

Остановимся подробнее на результатах расчёта разбавления сбросов при возможной запроектной аварии. На рис. 5, 6 показано рассеивание ореола по акватории реки. Ореол загрязнения с повышенными концентрациями приурочен к правому берегу реки. Постепенное расширение ореола одновременно с падением концентрации фиксируется по мере удаления от точки сброса (см. рис. 5).

На рис. 6 приведены поперечные профили концентрации на различном удалении от источника. Профили показывают, что область первоначального перемешивания (стадия 1) распространяется на расстояние до 10 км вниз по реке от точки сброса, после чего наблюдается выравнивание концентрации загрязняющих компонентов по всему сечению русла реки. На графиках видно, как в районе водозабора речных вод вдоль левого берега реки формируется область (полоса) шириной 50 м, где влияние от сброса отсутствует либо незначительно.

Таким образом, расчёты демонстрируют, что природные особенности разбавления стока в исследуемом водотоке позволяют безопасно сохранить на противоположном берегу сброс от предприятия в границах 2-го пояса ЗСО, удалённо-го на 2 км выше по течению реки от питьевого водозабора.

Обсуждение

В рамках настоящей работы рассмотрены расчётные подходы к оценке разбавления стоков в речных водах, а также приведены реальные примеры формирования ореолов рассеивания от точечных источников на крупных реках России. Показано, что при точечном (локальном) сбросе в реку формируется ореол рассеивания. Из-за особенностей протекания дисперсионных процессов на противоположном берегу реки вниз по потоку от сброса может формироваться область

акватории (полоса), которую не затрагивает техногенное воздействие, или же это воздействие пренебрежимо мало. То есть существует потенциальная возможность совместной безопасной эксплуатации питьевого водозабора и промышленного объекта, расположенного в границах поясов зон санитарной охраны.

При обосновании сохранения промышленного объекта в границах ЗСО поверхностного водотока необходимо применять риск-ориентированный подход, который охватывает как штатные, так и возможные аварийные режимы эксплуатации объекта.

Расчёты разбавления должны учитывать не только вклад от рассматриваемого объекта, но и текущие фоновые показатели гидрохимического состава речных вод, а также возможное воздействие смежных объектов.

Оценку воздействия сбросов промышленных объектов на качество природных вод речного водозабора необходимо проводить при соответствующем обосновании параметров. В расчётах следует использовать данные фактических измерений непосредственно на территории исследований. В крайнем случае допускается использовать параметры, полученные на объектах-аналогах.

При сильной изменчивости скоростей воды, сложных контурах береговой линии водотока, большой площади акватории, сложной морфологии русла рекомендуется переходить от аналитических расчётов рассеивания к использованию двумерных и трёхмерных гидродинамических моделей [7, 11, 12].

Заключение

Применение описанных в статье подходов позволяет провести обоснование сохранения промышленных объектов в пределах поясов ЗСО поверхностных водотоков.

Литература

(п.п. 4, 7–9, 11 см. References)

1. Доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году». М.: Росводресурсы, НИИ-Природа; 2022.
2. Курьиндин А.В., Шаповалов А.С., Строганов А.А., Орлов М.Ю., Тимофеев Н.Б., Коршунков А.В. и др. *Методическое пособие по вопросам регулирования выбросов и сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду*. М.; 2023.
3. Караушев А.В., ред. *Методические основы оценки и регламентирования антропогенного влияния на качество поверхностных вод*. Ленинград: Гидрометеоздат; 1987.
5. Носов А.В., Ашанин М.В., Иванов А.Б., Мартынова А.М. Радиоактивное загрязнение Енисея, обусловленное сбросами Красноярского горно-химического комбината. *Атомная энергия*. 1993; 74(2): 144–9.
6. Носов А.В., Крылов А.Л., Киселев В.П., Казаков С.В. *Моделирование миграции радионуклидов в поверхностных водах*. М.: Наука; 2010.
10. Борзилов В.А., Возженников О.И., Новицкий М.А. Математическая модель поступления и переноса химикатов по большой реке. В кн.: *Поведение пестицидов и химикатов в окружающей среде: Труды советско-американского симпозиума*. Ленинград: Гидрометеоздат; 1991: 140–59.
12. Клеванный К.А., Смирнова Е.В. Использование программного комплекса Cardinal. *Журнал университета водных коммуникаций*. 2009; (1): 153–62. <https://elibrary.ru/mtbmsr>

References

1. Report «On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2020». Moscow: Rosvodresursy, NIA-Priroda; 2022. (in Russian)
2. Kuryndin A.V., Shapovalov A.S., Stroganov A.A., Orlov M.Yu., Timofeev N.B., Korshunkov A.V., et al. *Methodological Manual on Regulating Environmental Pollution and the Discharge of Radioactive Substances into the Environment [Metodicheskoe posobie po voprosam regulirovaniya vybrosov i sbrosov radioaktivnykh veshchestv v okruzhayushchuyu sredu]*. Moscow; 2023. (in Russian)
3. Karashev A.V., ed. *Methodological Basis for Assessing and Regulating Anthropogenic Impact on the Quality of Surface Waters [Metodicheskie osnovy otsenki i reglamentirovaniya antropogennogo vliyaniya na kachestvo poverkhnostnykh vod]*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1987. (in Russian)
4. IAEA. *Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Safety Report Series № 19*. Vienna; 2001.
5. Nosov A.V., Ashanin M.V., Ivanov A.B., Martynova A.M. Radioactive contamination of the Yenisei caused by discharges from the Krasnoyarsk Mining and Chemical Combine. *Atomnaya energiya*. 1993; 74(2): 144–9. (in Russian)
6. Nosov A.V., Krylov A.L., Kiselev V.P., Kazakov S.V. *Modeling the Migration of Radionuclides in Surface Waters [Modelirovanie migratsii radionuklidov v poverkhnostnykh vodakh]*. Moscow: Nauka; 2010. (in Russian)
7. Mellor G.L. *Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model*. Princeton: Princeton University; 2004.
8. Booth R.S. A systems analysis model for calculating radionuclide transport between receiving water and bottom sediments. In: Miller M.W.M., ed. *Environmental Toxicity of Aquatic Radionuclides: Models and Mechanisms*. Ann Arbor: Ann Arbor Science; 1976: 133–64.
9. Di Toro D.M., O'Connor D.J., Thomann R.V. *Simplified Model of the Fate Portioning Chemicals in Lakes and Streams. Modelling the Fate of Chemicals in Aquatic Environment*. Ann Arbor: Ann Arbor Science; 1982: 165–90.
10. Borzilov V.A., Vozzhennikov O.I., Novitskii M.A. Mathematical model of the entry and transfer of chemicals along a large river. In: *Behavior of Pesticides and Chemicals in the Environment: Proceedings of the Soviet-American Symposium [Povedenie pestitsidov i khimikatov v okruzhayushchei srede: Trudy sovetsko-amerikanskogo simpoziuma]*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1991: 140–59. (in Russian)
11. Adcroft A., Hill C., Campin J.M. Overview of the formulation and numerics of the MITgcm. In: *Seminar Series on Numerical Methods, Recent Developments in Numerical Methods for Atmosphere and Ocean Modelling*. ECMWF; 2004: 139–49.
12. Klevannyi K.A., Smirnova E.V. Using the Cardinal software package. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii*. 2009; (1): 153–62. <https://elibrary.ru/mtbmsr> (in Russian)

Сведения об авторах

Никулеников Антон Михайлович, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр., зав. лаб. экспериментальной гидрогеологии и гидрогеомеханики Санкт-Петербургского отделения института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 199004, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: annik@hgepro.ru

Еремидей Геннадий Борисович, канд. мед. наук, Заслуженный врач РФ, вед. науч. сотр., руководитель отд. гигиены ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: yeremin45@yandex.ru

Степайкина Полина Владимировна, мл. науч. сотр. лаб. гидрогеологических прогнозов и моделирования Санкт-Петербургского отделения института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, 199004, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: pstepaikina@hgepro.ru

Борисова Дарья Сергеевна, мл. науч. сотр. отд. гигиены ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья», аспирант каф. профилактической медицины и охраны здоровья, ассистент каф. общей и военной гигиены «СЗГМУ им. И.И. Мечникова», 191015, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vyucheskaya.ds@gmail.com

Мозжухина Наталья Александровна, канд. мед. наук, доцент каф. профилактической медицины и охраны здоровья, каф. общей и военной гигиены ФГБОУ ВО «СЗГМУ им. И.И. Мечникова» Минздрава России, 191015, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Natalya.Mozzhukhina@szgmu.ru

Исаев Даниил Сергеевич, зав. отд. коммунальной гигиены ФБУН «СЗНЦ гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 191036, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: d.isaev@s-znc.ru

Information about the authors

Anton M. Nikulenkov, MD, PhD, leading researcher, head of the Laboratory of Experimental Hydrogeology and Hydrogeomechanics, Sergeev Institute of Geoecology, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, 199004, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-5498-076X> E-mail: annik@hgepro.ru

Gennadiy B. Yeregin, MD, PhD, Honoured Doctor of the Russian Federation, leading researcher, head of the Hygiene Department, Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, 199004, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1629-5435> E-mail: yeremin45@yandex.ru

Polina V. Stepaikina, junior researcher, Laboratory of Hydrogeological Forecasts and Modeling, St. Petersburg Branch of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, 199004, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-0438-2336> E-mail: pstepaikina@hgepro.ru

Darya S. Borisova, junior research fellow, Department of Hygiene, North-West Public Health Research Center, 191036, St.-Petersburg, 191036, Russian Federation, Postgraduate Student, Department of Preventive Medicine and Health Protection, Assistant, Department of General and Military Hygiene, North-West State Medical University named after I.I. Mechnikov, St.-Petersburg, 191015, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1778-4465> E-mail: vyucheskaya.ds@gmail.com

Natalya A. Mozhukhina, MD, PhD, Associate Professor, Department of Preventive Medicine and Health Protection, Department of General and Military Hygiene, North-West State Medical University named after I.I. Mechnikov, St.-Petersburg, 191015, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-8051-097X> E-mail: Natalya.Mozhukhina@szgmu.ru

Daniil S. Isaev, head of the Dept. of Communal hygiene North-West Public Health Research Center, 191036, St.-Petersburg, 191036, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-9165-1399> E-mail: d.isaev@s-znc.ru