

УДК 556.531.3;556.11

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И МАСШТАБОВ ДИФФУЗНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ, СФОРМИРОВАННОГО КРУПНЫМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ, НА ПРИМЕРЕ СОЛИКАМСКО-БЕРЕЗНИКОВСКОГО ПРОМУЗЛА

© 2020 г. А. П. Лепихин<sup>a, b</sup>, А. А. Возняк<sup>a, b, \*</sup>, Т. П. Любимова<sup>a, b</sup>,  
Я. Н. Паршакова<sup>a</sup>, Ю. С. Ляхин<sup>a</sup>, А. В. Богомолов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Пермский ФИЦ УрО РАН, Пермь, 614015 Россия

<sup>b</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Пермь, 614990 Россия

\*e-mail: AAVoznyak@gmail.com

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.

После доработки 15.03.2020 г.

Принята к публикации 16.03.2020 г.

Рассмотрены вопросы формирования и оценки диффузного загрязнения водных объектов в зонах размещения крупных горнодобывающих и химических производственных комплексов. Объект исследования – р. Кама (Камское водохранилище) на участке влияния Соликамско-Березниковского промузла. Основные потоки загрязнения связаны с фильтрационными разгрузками от действующих и законсервированных шламоохранилищ и накопителей жидких и твердых отходов. Выявление антропогенного воздействия и расчеты его качественных и количественных характеристик проведены на основе данных экспедиционных исследований, данных государственного мониторинга и математического моделирования. Рассмотрены особенности формирования локальных зон загрязнения на рассматриваемом участке р. Камы (Камского водохранилища), связанные с существенной вертикальной неоднородностью, – содержание загрязняющих веществ в придонных областях может более чем на порядок превышать их содержание в поверхностном слое. Установлено, что >90% загрязнения на данном участке Камского водохранилища поступает диффузным путем. Предложено шесть типов мероприятий по уменьшению диффузного стока в зоне влияния Соликамско-Березниковского промузла.

*Ключевые слова:* диффузное загрязнение водных объектов, Камское водохранилище, влияние Соликамско-Березниковского промузла, мероприятия по уменьшению диффузного стока.

DOI: 10.31857/S0321059620050120

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время декларируются и регламентируются, как правило, точечные источники загрязнения. Анализ состояния водных объектов показывает, что на их гидрохимический режим могут существенное влияние оказывать рассредоточенные неточечные источники загрязнения, рассматриваемые здесь как диффузные. В большинстве случаев такие источники загрязнения связывают со смывом загрязняющих веществ с сельскохозяйственных угодий и городских агломераций. Однако в зонах очень высокой техногенной нагрузки, обусловленной горнодобывающими и крупнотоннажным химическими комплексами, таким источником загрязнения могут быть фильтрационные разгрузки от шламоохранилищ и породных отвалов.

Таким примером очень высокой техногенной нагрузки на водные объекты является Соликамско-Березниковский промышленный узел, разрабатывающий одно из крупнейших в мире месторождение калийных и магниевых руд – Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей (ВКМКМС).

В ранее выполненных работах [4–7] отмечалось, что фактические наблюдаемые уровни загрязнения р. Камы (Камское водохранилище) существенно превышают декларируемые регламентные нагрузки.

Возможные причины этой ситуации следующие: несоблюдение регламентных условий сбросов по декларируемым водовыпускам сточных вод; недеклаируемый сброс сточных вод через точки водовыпуска;

недекларируемые фильтрационные разгрузки от шламохранилища и породных отвалов;

естественные высокоминерализованные рассолы и самоизливы из старых незатапливаемых скважин, расположенных в зоне затопления Камского водохранилища.

Для построения эффективных схем охраны поверхностных водных объектов на данном участке р. Камы принципиальную роль играет оценка масштабов вышеуказанных факторов. Для этих целей необходимо, в первую очередь, иметь достаточно объективную картину распределения зоны загрязнения р. Камы на рассматриваемом участке при различных гидрологических режимах, которая может быть получена только на основе детальных полевых исследований.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Проведено три экспедиционных обследования рассматриваемого участка р. Камы: первое – в конце весны 2018 г., на спаде весеннего половодья, второе и третье – в летний период 2018 и 2019 гг., период меженных расходов. Значительная часть района работ находится в зоне подпора от Камской ГЭС. В период первого (июнь 2018 г.) и второго (август 2018 г.) обследований уровни воды были достаточно близки и составляли 108.2–108.5 м БС. В период третьего (август 2019 г.) обследования уровни воды были существенно выше и составляли 109.1–109.2 м БС. Соответственно, расходы существенно отличались. Так, в 2018 г. во время проведения полевых работ в период летней межени расход воды составлял ~586 м<sup>3</sup> с, меженный же расход 2019 г. был близок к паводочному 2018 г. – 2218 м<sup>3</sup> с.

Основной задачей данных полевых исследований являлось установление распределения загрязняющих веществ как по акватории, так и по глубине рассматриваемого участка р. Камы (Камское водохранилище) для идентификации зон разгрузки диффузионных источников загрязнения. Так как потенциальными загрязняющими ингредиентами являются минеральные соли (NaCl, KCl, MgCl<sub>2</sub>), связанные с разработкой и освоением ВКМКС, то для обеспечения охвата наиболее детальной сетки наблюдений района работ основные наблюдения были выполнены путем измерения удельной электропроводности воды в мкСм/см, имеющей устойчивую связь с общей минерализацией воды [1]. Использование данного комплексного подхода с применением оперативного физического метода определения качества воды позволило обеспечить достаточно детальную съемку распределения качества воды на всем участке работ. Общая протяженность

участка работ по р. Каме составляет 75 км от п. Тюлькино (верхний створ) до п. Орел (нижний створ). Всего было выполнено 187 вертикалей с определением качества воды по глубине с шагом 1 м.

Характерной особенностью как большинства сточных вод, так и фильтрационных разгрузок, является их высокая минерализация и, как следствие, их высокая плотность. Данное обстоятельство обуславливает существенную неоднородность распределения удельной электропроводности воды на участках активного техногенеза. Впервые значительная неоднородность минерализации воды по глубине р. Кама в районе г. Березники была описана еще в 1959 г. [3].

Также характерная особенность данного участка работ, в первую очередь между городами Соликамском и Березники, – очень сложная морфометрия русла р. Камы, наличие многочисленных протоков. Как показали натурные исследования, а также вычислительные эксперименты, эти протоки – каналы переноса на значительное расстояние высокоминерализованных загрязненных стоков и фильтрационных разгрузок в период летней межени.

По материалам экспедиционных исследований были построены картосхемы распределения загрязненности воды в придонной области и поверхностном слое рассматриваемого участка р. Камы (Камского водохранилища). Они представлены на рис. 1, 2.

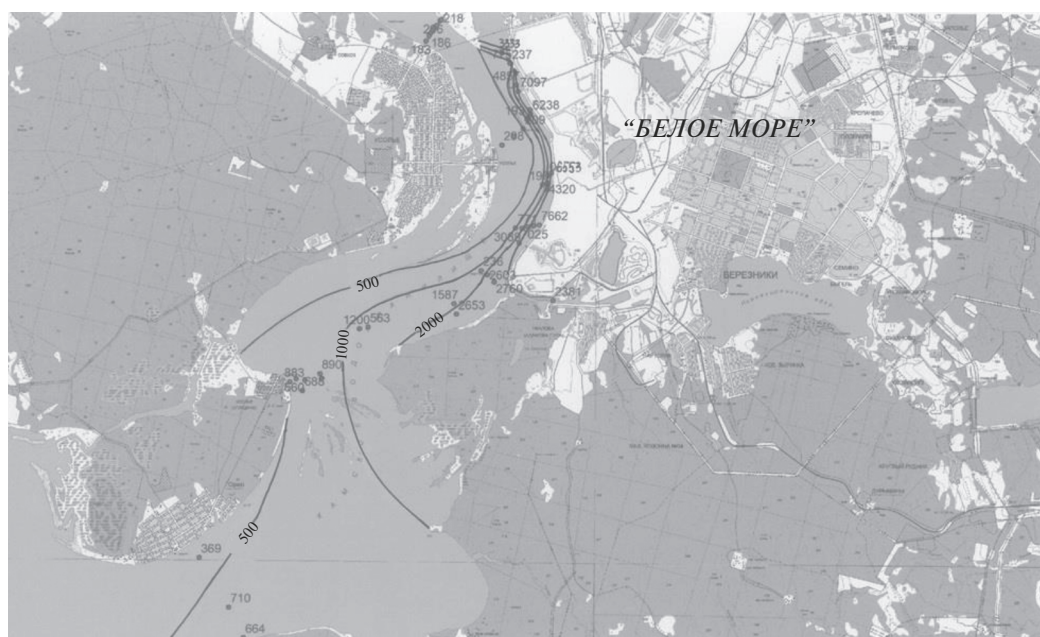
Из рис. 1, 2 следует, что распределение зон загрязнения существенно неоднородно как по акватории, так и по глубине водного объекта. Наиболее высокие уровни загрязнения наблюдаются в придонной области у левого берега р. Камы в непосредственной близости от шламохранилища “Белое море”. Высокие значения удельной электропроводности обуславливаются, по-видимому, фильтрационными разгрузками из данного объекта. Косвенным подтверждением данной гипотезы является очень высокое содержание в придонной области ионов кальция, что характерно для сточных вод содовой промышленности, но совершенно нетипично для рассолов калийной промышленности.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как уже отмечалось, под диффузными источниками загрязнения подразумеваются в работе все не декларируемые как точечные, так и рассредоточенные источники загрязнения. При этом может быть несколько независимых схем оценки интенсивности этих диффузных источников загрязнения. Если неизвестен механизм формирования в водном объекте данного загрязнения, то



**Рис. 1.** Картограмма распределения минерализации для периода летней межени в поверхностном слое воды Камского водохранилища в районе г. Березники. Цифры у точек — общая минерализация, мг/л.



**Рис. 2.** Картограмма распределения минерализации для периода летней межени в придонной области Камского водохранилища в районе г. Березники. Цифры у точек — общая минерализация, мг/л.

наиболее простой и очевидный способ оценки интенсивности потоков диффузного загрязнения может быть построен на основе анализа балансовых схем потоков химических веществ на определенном участке водного объекта. Однако он дает только интегральную оценку относительно определенного участка водного объекта. Детализация

при данной схеме расчетов достигается путем уменьшения протяженности расчетных участков.

В общем виде интенсивность привноса  $k$ -го поллютанта диффузными источниками на конкретном участке водотока может быть оценена следующим образом:

$$q_{\text{лат}k} = \overline{\int_{F_{\text{контр}}} C_k(f,t)V(f,t)df - \int_{F_{\text{фон}}} C_k(f,t)V(f,t)df} - q_{\Sigma \text{дек}}, \quad (1)$$

где  $q_{\text{лат}k}$  — средняя за интервал времени  $T$ , с, интенсивность диффузного загрязнения для  $k$ -го ингредиента, г/с;  $V(f, t)$ ,  $C_k(f, t)$  — соответственно распределения скорости течения м/с и содержания, г/м<sup>3</sup>, рассматриваемого  $k$ -го поллютанта по сечению  $F$ , м<sup>2</sup>, в контрольном и фоновом створах в момент времени  $t$ , с;  $q_{\Sigma \text{дек}}$  — суммарная интенсивность декларируемых источников на данном участке водотока, определенная по 2-ТП (водхоз), г/с.

Нетрудно видеть, что погрешность данного подхода в значительной мере определяется объективностью оценки потоков поллютантов в конкретном створе, что, в свою очередь, зависит от равномерности распределения качества воды по живому сечению водного объекта. При равномерном распределении поллютантов в сечении потока можно успешно оперировать средними концентрациями и расходами воды.

В этом случае средняя интенсивность диффузного загрязнения от латентных источников, рассматриваемых как диффузных, поступающего на определенном участке водотока, оценивается как невязка потоков рассматриваемых загрязняющих веществ по формуле

$$q_{\text{лат}k} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1} (C_{k,1,i}Q_1 - C_{k,2,i}Q_2) - q_{\Sigma \text{дек}} \quad [\text{г/с}], \quad (2)$$

где  $q_{\text{лат}k}$  — средняя интенсивность диффузного загрязнения для  $k$ -го ингредиента, г/с;  $C_{k,1,i}$  и  $C_{k,2,i}$  — концентрации  $k$ -го ингредиента в  $i$ -той точке измерения соответственно для 1-го и 2-го створов в начале и конце участка, г/м<sup>3</sup>;  $Q_1$  и  $Q_2$  — расходы воды рассматриваемого водотока во времена, соответствующие отборам проб воды в 1-м и 2-м створах, м<sup>3</sup>/с.

Интегральная оценка диффузной составляющей техногенного загрязнения, поступающего на рассматриваемом участке в р. Каму (Камское водохранилище), проводилась на основе прямой балансовой схемы. При этом для оценки потоков веществ в самом водотоке-приемнике использовались два совершенно независимых массива данных. Материалы сетевых наблюдений Пермского ЦГМС за период с 1994 по 2015 г., а также материалы детальных полевых исследований, выполненных в июне–августе 2018 г. Характерной особенностью материалов сетевых наблюдений является то, что при их проведении отбор проб проводится только на одной вертикали и на двух горизонтах: поверхность, дно — что не может в полной мере отразить наблюдаемую на рис. 1, 2 неоднородность распределения концентраций загрязняющих веществ как по акватории, так и по

глубине водного объекта. В то же время при проведении полевых работ оценки проводились по значительно более детализированной схеме. Поэтому по данным экспедиционных исследований определение расхода воды в расчетном створе проводилось с использованием поля скоростей и профиля русла, а расчет массы ЗВ — с использованием поля концентраций.

Для выделения из общего потока загрязняющих веществ в створах составляющей от декларируемых источников были использованы материалы государственной отчетности 2-ТП (водхоз) Пермского края.

В качестве фонового створа при анализе массы загрязняющих веществ в р. Каме был выбран створ пгт Тюлькино, так как, согласно ранее проведенным работам [4–6] и данным 2-ТП (водхоз) Пермского края, свидетельствующих об отсутствии сбросов сточных вод выше этого створа, данные по створам пгт Тюлькино представляют собой естественный химический состав природных вод р. Камы. Контрольный створ назначен в районе г. Орла, расположенного ниже г. Березники (рис. 1, 2). Морфологические особенности данного участка (поворот на 90° и сужение русла) способствуют выравниванию по ширине концентраций загрязняющих веществ, поступивших выше по течению. Таким образом, створ у г. Орла представляет в интегральной форме всю массу загрязняющих веществ, полученную р. Камой в районе Соликамско-Березниковского промышленного узла. Помимо приведенного обоснования расположения створов необходимо указать также наличие в этих створах наблюдений государственного мониторинга. При этом, благодаря морфологическим особенностям русла у г. Орла, способствующим значительному перемешиванию, масса загрязняющих веществ, переносимая в данном створе водой р. Камы, совпадает по расчетам по данным Пермского ЦГМС и по данным экспедиционных исследований. В створах, расположенных выше по течению, в пределах Соликамско-Березниковского промышленного узла, таких совпадений в расчетах общей массы загрязняющих веществ не наблюдается в связи с существенной неоднородностью распределения загрязнений по ширине и глубине потока.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполненные расчеты с использованием данных независимых массивов исходных данных показали, что расчетные показатели интенсивности диффузного загрязнения по разным массивам

**Таблица 1.** Масса загрязняющих веществ (тыс. т), переносимая р. Камой в разных створах и от разных источников

Створ/Источник	Магний	Хлориды	Сульфаты	Минерализация	Калий	Натрий
В контрольном створе (Огурдино)	213.9	5810	864	13734	395	1078
В фоновом створе (Тюлькино)	119.5	366	525	3825	154	400
Привнос на участке	94.4	5444	339	9909	241	678
По 2-ТП (водхоз)	6	269	20	556	38.9	98.3
Диффузный привнос	88.4	5175	319	9353	202	579
Доля привноса от диффузного стока, %	93.6	95.1	94.1	94.4	83.9	85.5

данных весьма близки: различия  $\leq 15\%$ , что свидетельствует, с одной стороны, о приемлемости данной схемы оценки диффузного загрязнения в пределах рассматриваемого участка водного объекта, а с другой – свидетельствует о значительной стабильности, инерционности этих потоков загрязнения.

Выполненные расчеты показали, что в результате диффузного загрязнения на участке Камского водохранилища в районе Соликамско-Березниковского промузла привносится 5.8 млн т минеральных солей (общая минерализация) в год при средней интенсивности 185 кг/с, в том числе на участке Камского водохранилища, прилегающего к г. Березники,  $\sim 161$  кг/с.

Вклад диффузной составляющей в формировании загрязнения р. Камы в районе Соликамско-Березниковского промузла по отдельным ингредиентам представлен в табл. 1 и колеблется от 83.9% по калию до 95.1% по хлоридам.

Если известны доминирующие механизмы формирования диффузного загрязнения, задача его оценки значительно конкретизируется. Как уже отмечалось, наиболее интенсивно диффузное загрязнение формируется вследствие фильтрационных разгрузок из шламоохранилищ.

Учитывая доминирующий вклад фильтрационных разгрузок, удельная локальная интенсивность диффузного загрязнения может быть оценена на основе следующего соотношения:

$$q_{\text{диф}} = \iint_0^{LH} \left( K_{ZZ} \frac{\partial C}{\partial Z} \right) dy dx, \quad (3)$$

где  $K_{ZZ}$  – коэффициент турбулентной диффузии по оси  $Z$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $L$ ,  $H$  – характерные размеры зоны фильтрации по осям  $X$  и  $Y$ , м.

Наиболее эффективно данная схема оценки может быть реализована при сопряженном расчете фильтрационных разгрузок из накопителей жидких отходов (рассолов) и формировании зон загрязнения в водотоках [2, 8].

По данной схеме был выполнен трехмерный расчет зон формирования диффузного загрязнения вследствие фильтрационных разгрузок Кам-

ского водохранилища из расположенного на левом берегу шламоохранилища “Белое море”, где по данным полевых исследований наблюдаются максимальные фильтрационные разгрузки. Исходя из установленного факта фильтрационных разгрузок была поставлена следующая задача: имея характерные линейные размеры источника и его интегральную интенсивность, воспроизвести распределение полей наблюдаемой минерализации в водохранилище. Численное моделирование проводилось в рамках трехмерного подхода при помощи пакета прикладных программ ANSYS Fluent, позволяющего моделировать течение жидкостей и газов с учетом турбулентности и неоднородностей концентрации.

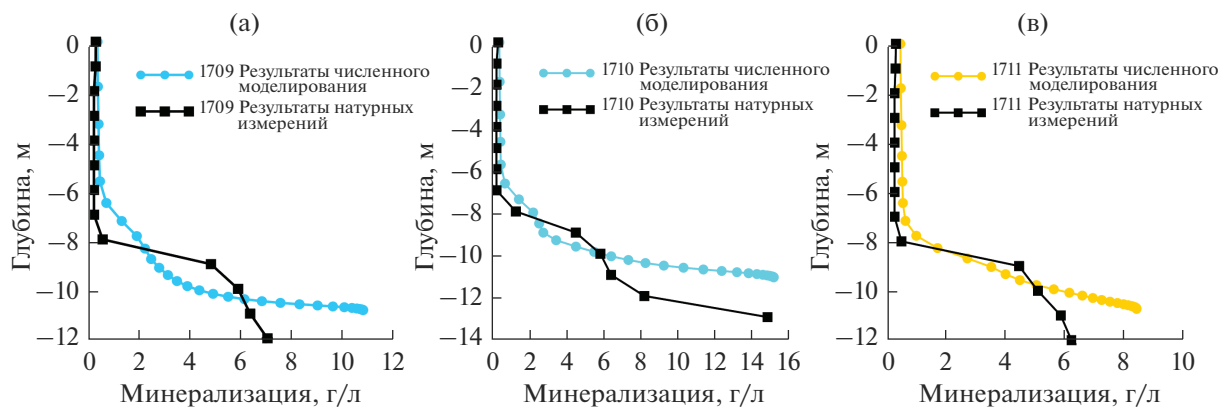
Рассматривался процесс диффузного истечения рассола из плоского прибрежного участка с тремя вариантами линейного размера 200, 550, 1100 м и вертикальным размером 1 м. Расположение и геометрия расчетной области показаны на рис. 3. Строилась неравномерная сетка с учетом морфометрии речного дна. Размерность сетки составляла порядка четырехсот тысяч узлов. Задача решалась методом конечных объемов. Турбулентные течения описывались в рамках  $k$ – $\epsilon$  модели.

На рис. 4 показано сопоставление результатов численного моделирования и натурных измерений для разных контрольных вертикалей в случае линейного источника размером 1100 м и вертикальным размером 1 м. Как видно, и натурные измерения, и численное моделирование показывают формирование значительной вертикальной неоднородности и слоя скачка, на одном и том же для всех вертикалей расстоянии от дна, наблюдается не только качественное, но и количественное согласие результатов.

Таким образом, на основе экспедиционных исследований, расчетов и математического моделирования было установлено, что на рассматриваемом участке р. Камы наиболее значимое антропогенное воздействие оказывает диффузное загрязнение, непосредственно связанное с проблемой утилизации избыточных рассолов, возникающих при крупномасштабном освоении одного



**Рис. 3.** Расположение и геометрия расчетной области Камского водохранилища для трехмерного численного моделирования процесса истечения рассола из прибрежного участка в районе “Белого моря”.



**Рис. 4.** Распределение минерализации по глубине по данным численных расчетов и натуральных измерений для вертикалей 1709 (а), 1710 (б) и 1711 (в).

из крупнейших в мире Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВКМКМС).

Для минимизации воздействия избыточных рассолов на водные объекты Соликамско-Березниковского промышленного узла в бассейне р. Камы предложены следующие схемы реализации водоохраных мероприятий по защите от антропогенных воздействий:

1) Разбавление отводимых стоков до экологически безопасного уровня; регулирование сброса сточных вод в зависимости от гидрологического и

гидрохимического режима приемника сточных вод;

2) захоронение производственных отходов в геологических структурах; отведение избыточных рассолов в подземные горизонты;

3) технологический подход – создание безотходных схем производств готовой продукции; переход на новые безводные технологии обогащения калийных руд;

4) использование отходов производства в народном хозяйстве;

5) выведение избыточных рассолов за пределы ВКМКМС;

6) комбинированный подход, т.е, использование одновременно нескольких из выше перечисленных схем.

## ВЫВОДЫ

Характерная особенность формирования диффузного неточечного загрязнения на рассматриваемом участке р. Камы — не смыв загрязняющих веществ с водосборной поверхности, а фильтрационные разгрузки, в первую очередь от техногенных комплексов.

Характерной особенностью формирования локальных зон загрязнения на рассматриваемом участке р. Камы (Камского водохранилища) является их очень существенная вертикальная неоднородность. Как показали результаты натурных исследований в зонах активного техногенеза, содержание загрязняющих веществ в придонных областях может более чем на порядок превышать их содержание в поверхностном слое.

Проведенные исследования показали, что действующая система мониторинга и регламентации техногенных воздействий на водные объекты нуждается в очень серьезных доработках. Это относится как к организации и проведению государственного и ведомственного мониторинга, так и к пересмотру и корректировке регламентируемых методов расчетов процессов разбавления.

Декларированные в действующих нормативных методических документах методы расчетов, предложенные более 50 лет назад, не учитывают плотностные эффекты и дают совершенно искаженные результаты.

Наблюдаемая картина загрязнения р. Камы в пределах Соликамско-Березниковского промузла сложилась, на взгляд авторов, в результате совокупности следующих четырех групп факторов:

фильтрационные разгрузки из действующих шламохранилищ и породных отвалов;

естественные выходы высокоминерализованных рассолов;

несанкционированные сбросы сточных вод;

некорректность устанавливаемых норм сброса.

Наиболее заметно и явно фильтрационные разгрузки проявляются у левого берега р. Камы, в непосредственной близости от шламохранилища «Белое море». Эта зона отчетливо идентифици-

руется результатами как весеннего, так и летнего опробования.

Помимо качественной фиксации нерегламентированного загрязнения проведено количественное определение объемов диффузного стока по двум предложенным методам расчета. Результаты трехмерного моделирования полностью подтвердили картину диффузного загрязнения как в качественном, так и в количественном измерении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Девяткова Т.П., Лепихин А.П., Бурматова Э.А.* Применение кондуктометрического метода изучения трансформации сточных вод в Камском водохранилище // Гидрология и метеорология. Пермь: Изд-во ПГУ, 1971. Вып. 6. С. 80–86.
2. *Куваев А.А., Гончаренко Д.Б., Семенов М.Е.* Моделирование разгрузки высокоминерализованных подземных вод в реку в районе хвостохранилища // Математическое моделирование в гидрогеологии. М.: Изыскатель, 2008. С. 44–45.
3. *Куликов Г.И.* Влияние сброса химической промышленности на минерализацию воды Камского водохранилища в районе г. Березники // Материалы Всесоюз. совещ. по вопр. эксплуатации Камского водохранилища. Пермь, 1959. Вып. 2. С. 1–13.
4. *Лепихин А.П., Богомолов А.В., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н.* Особенности организации рассеивающих водовыпусков для отведения избыточных рассолов в водные объекты // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 2. С. 72–87.
5. *Лепихин А.П., Мирошниченко С.А.* Особенности формирования техногенных воздействий на водные объекты Соликамско–Березниковского промузла // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2003. № 5. С. 411–439.
6. *Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А.* К проблеме отведения избыточных рассолов в водные объекты предприятиями калийной промышленности // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2010. № 3. С. 57–74.
7. *Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А.* Численное моделирование разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в турбулентных потоках // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. № 5. С. 68–79.
8. *Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Циберкин К.Б.* Численное моделирование инфильтрации жидких отходов из хранилища в прилегающие грунтовые воды и поверхностные водоемы // Вычисл. механика сплошных сред. 2015. Т. 8. № 3. С. 310–318.