

УДК 502.2: 556.18

## МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИМ БАЛАНСОМ ВОДОСБОРОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Савичев Олег Геннадьевич<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Гусева Наталья Владимировна<sup>1</sup>,  
Guseva24@yandex.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** определяется наличием нерешенных вопросов оценки состояния водных объектов, их долгосрочного прогноза, нормирования антропогенных воздействий, очистки сточных вод и рекультивации водных объектов в Западной Сибири.

**Цель:** разработка методологии управления геохимическим балансом водных экосистем Западной Сибири в различных природных и антропогенных условиях.

**Методы:** ландшафтно-геохимический, географо-гидрологический, статистические методы, методы математического моделирования водного стока и химического состава вод.

**Результаты и выводы.** Предложена методология управления геохимическим балансом водосборной территории, заключающаяся в: 1) оценке состояния водных объектов, тенденций его изменения и антропогенного влияния; 2) построении комплекса математических моделей, описывающих формирование водного стока и химического состава вод; 3) разработке мероприятий, позволяющих минимизировать антропогенное влияние на водные объекты; 4) оценке эффективности водоохраных мероприятий путем сравнения результатов наблюдений и моделирования. Разработан алгоритм определения элементов геохимического баланса водосборов. Охарактеризована направленность геохимических процессов в водных объектах Западной Сибири. Сформулированы ключевые аспекты выбора методов очистки сточных вод и рекультивации нарушенных земель. Показано, что строительство очистных сооружений целесообразно, если сброс неочищенных сточных вод составляет более 5 % от стока в замыкающем створе. Оптимальная структура очистки сточных вод предполагает широкое использование отстойников и сооружений биологической очистки с естественной аэрацией, которые рекомендуется совместить с естественными понижениями рельефа в долинах рек или внутри болот при условии инженерной защиты территории. Рекультивация может считаться эффективной, если разница между значениями элементов баланса до нарушения и после рекультивации не превышает 20 %.

### Ключевые слова:

Водный и геохимический баланс, речные водосборы, управление геохимическим балансом, Западная Сибирь, заболоченные территории.

### Введение

Улучшение состояния водных экосистем и эффективное долгосрочное водопользование возможны только в случае, когда есть понимание, как функционирует водная экосистема в целом, установлены основные факторы формирования ее эколого-геохимического состояния, количественно объективно оценен вклад каждого из факторов, имеются надежные и адекватные сложившимся природным и социально-экономическим условиям способы управления этими факторами. В настоящее время достигнуты значительные успехи в моделировании гидрологических и гидрохимических процессов [1–10], разработке теории управления водными ресурсами [2, 5, 11–13] и способов очистки сточных вод и утилизации образующихся отходов [14–17].

Однако имеется и большое количество нерешенных вопросов оценки состояния водных объектов, их долгосрочного прогноза, нормирования воздействий [11, 13, 18]. Так, в Российской Федерации (РФ) в целом разработана и внедрена система нормирования сбросов сточных вод (которая в основном сводится к оценке предельного воздействия при наихудших условиях разбавления стоков), но пока недостаточно проработаны вопросы оценки природной и антропо-

генной составляющих фоновых концентраций, нормирования воздействий на донные отложения, водный режим и ряд других. Также следует отметить, что технологии очистки сточных вод и рекультивации водных объектов весьма дороги и часто неэффективны относительно их стоимости, особенно с учетом того, что достижение ряда целевых показателей качества после строительства канализационных очистных сооружений (КОС) с использованием наилучших доступных технологий не всегда возможно.

Все это и определяет актуальность разработки методологии управления геохимическим состоянием природно-территориальных комплексов на основе составления и анализа системы уравнений водного и геохимического балансов для водных экосистем и их водосборов. Если методология и методика анализа теплового, водного и водохозяйственного балансов достаточно разработана [2–5, 19, 20], то вопросы составления и анализа геохимического баланса проработаны пока недостаточно. Конечно, известны общие подходы к составлению гидрохимического баланса, стока растворенных веществ и их генезиса [10, 21, 22], а в Министерстве природных ресурсов и экологии (МПР) России разработаны нормативные документы по расчёту химического стока рек, поступлению за-

грязняющих веществ (ЗВ) из диффузных источников, нормированию сбросов ЗВ на основе анализа упрощенного уравнения гидрохимического баланса [23, 24].

Но пока нет теоретически обоснованных и одновременно применимых на практике методов: оценки аккумуляции и переноса веществ в донных и пойменных отложениях и вторичного загрязнения вод от донных отложений в разные фазы водного режима (с учётом размыва и аккумуляции донных отложений, изменения стока взвешенных и влекомых наносов); оценки загрязнения водных объектов в результате загрязнения атмосферного воздуха; оценки образования и трансформации веществ в самих водных экосистемах при взаимодействии воды, органического вещества (ОВ), растворённых газов, подстилающих и водовмещающих горных пород, донных отложений и речных наносов; трансформации геохимического состояния при эволюции водных экосистем (например, изменение химического состава болотных вод по мере эвтрофикации озёр и образования сперва низинных, а потом переходных и верховых болот; изменение химического состава бессточных озёр при изменении климата и так далее); оценки изменения форм миграции химических элементов и адекватного их учета при оценке состояния водных экосистем; оценки природной и антропогенной составляющих химического состава вод (в настоящее время в РФ на практике все, что больше нормативов, считается результатом влияния хозяйственной деятельности без учета природных условий); оценки взаимосвязей между химическим составом подземных и поверхностных вод; оптимального выбора методов очистки с учётом особенностей окружающей среды, климата, хозяйственной деятельности и прогнозов их изменения; оптимального размещения производственных и непроизводственных объектов с учётом изменения гидрологических и геохимических характеристик (например, изменения площади водосбора  $F$  и водного режима при строительстве объектов инфраструктуры, активизация карстовых, термокарстовых и иных опасных процессов и т. д.); систематического вовлечения продуктов и отходов производства в геохимические циклы, характерные для конкретного региона.

Ряд указанных выше вопросов в той или иной мере рассматривается в работах В.И. Данилова-Данильяна, Т.И. Моисеенко, А.М. Никанорова, Б.Н. Рыженко, С.Л. Шварцева и многих других [1, 10–13, 22, 25], но удовлетворительные решения получены далеко не во всех случаях. И самое главное – отсутствует обоснованный и реально выполнимый общий алгоритм составления и анализа геохимического баланса водной экосистемы и её водосбора, принятия решений о целесообразности строительства очистных сооружений, систем инженерной защиты и мелиоративных систем, влияющих на эколого-геохимическое состояние территорий, определения способов очистки, использования донных отложений, торфов, загрязнённых грунтов, ила сточных вод и т. д. Соответственно, цель рассматриваемого исследования, выполненного в 2017–2020 гг. в Томском политехническом университете (ТПУ) и Томском филиале

Института нефтегазовой геологии и геофизики (ТФ ИНГГ) СО РАН – разработка методологии управления геохимическим балансом природно-антропогенных водных экосистем Западной Сибири в различных природных и антропогенных условиях на основе концепции трансформации антропогенных объектов в природно-антропогенные, а природно-антропогенных – в природные.

#### Объект и методика исследования

Западная Сибирь – огромный регион, границы которого разными авторами часто понимаются неодинаково. Далее под Западной Сибирью будет пониматься территория, соответствующая по естественно-историческому районированию бывшего СССР (приводится по [26]) физико-географическим странам: Западно-Сибирская низменность (полностью), Саяно-Алтайская горная страна (Алтайская провинция), Казахская складчатая страна (в границах водосбора р. Иртыша и его притоков), горная страна Урал (исток ряда притоков рек Оби и Иртыша). В пределах этой территории выделяются физико-географические страны с вертикальной зональностью и зоны тундры, лесотундры, лесов (тайги), лесостепи и степи. Ее большая часть совпадает с границами бассейна р. Оби (обычно дополнительно выделяют участки верхнего, среднего и нижнего течения Оби и отдельно – водосбор Иртыша; верхний – от истоков рек Катунь и Бий/Чулышмана до устья Томи; средний – от устья Томи (включая водосбор Томи) до устья Иртыша, нижний – ниже по течению от устья Иртыша), а на северо-западе – с бассейнами рек Таз, Пур и водосборами левобережных притоков р. Енисей.

Важной особенностью равнинной части этой территории являются интенсивная нефтегазодобыча, в процессе которой ежедневно сжигается 6–7 млрд м<sup>3</sup> попутного газа, размещается огромное количество отходов бурения и происходит не менее одной аварии с потерей в среднем 2 т нефти, причем общие потери углеводородов достигают 7–20 % от суммарной добычи [27, 28]. Другая важная особенность – исключительно высокая заболоченность водосборов с продолжающимся приростом торфяной залежи со скоростью примерно 1 мм/год [29, 30]. В водосборах Томи, Чулыма и на участке верхнего течения Оби в огромных количествах добывается и перерабатывается уголь, черные и цветные металлы, строительные материалы [28]. Все вместе это определяет современное эколого-геохимическое состояние поверхностных водных объектов в Западной Сибири, характеризующееся распространением пресных (как правило, гидрокарбонатных кальциевых) вод с высоким содержанием ОВ и продуктов их трансформации, часто превышающим предельно допустимые концентрации (ПДК) для водных объектов хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного назначения [31]. С учетом этого основными объектами исследования выбраны гидрологически изученные малые и средние реки [31–33], сток которых формируется в типичных для каждой из зон природных условиях и с разной степенью антропогенной нагрузки.

Методы охраны водных объектов (как и окружающей среды в целом) условно можно разделить на группы по: 1) соотношению времени воздействия и ожидаемых результатов – методы предупреждения экологических проблем (внедрение ресурсосберегающих технологий; управление инвестиционным проектом строительства от инженерных изысканий до разработки нормативов допустимого воздействия и правил эксплуатации; экологического просвещения; инженерных методов создания пограничных и охраняемых систем) и методы ликвидации или смягчения последствий экологических проблем (очистка сточных вод, мелиорация и рекультивация, дноуглубительные и иные аналогичные работы); 2) характеру воздействия – прямые, косвенные; 3) субъекту управления – методы государственного управления и управления на уровне природопользователя.

С учетом указанных выше концепций (от антропогенных объектов к природным) и классификации методов охраны водных объектов для достижения цели исследования рассмотрены следующие взаимосвязанные задачи: А) в части информационного обоснования управляющих воздействий: 1) разработка и обоснование методики составления и анализа геохимического баланса водного объекта и его водосбора; 2) выявление связей между элементами геохимического и водного балансов в различных природных зонах Сибири; 3) исследование направленности геохимических процессов в водных объектах и их водосборах при изменениях климата и хозяйственной деятельности; В) в части планирования воздействий, сочетающих методы предупреждения и ликвидации негативных последствий: 4) разработка и обоснование методики оптимального выбора методов очистки сточных вод с учётом природных условий и характера хозяйственной деятельности; 5) разработка и обоснование методики оптимального выбора способов восстановления нарушенных водных экосистем с учётом природных условий и характера хозяйственной деятельности.

При этом ключевой подход к их решению заключался в: 1) оценке природных тенденций и антропогенного влияния на водные объекты; 2) построении комплекса математических моделей; 3) разработке мероприятий, позволяющих минимизировать антропогенное влияние; 4) оценке эффективности проектируемых мероприятий путем сравнения результатов наблюдений и моделирования. Оценка адекватности моделей данным наблюдений проводилась с использованием критерия  $NSE$  [34] и корреляционного отношения  $R^2$  [8], статистический анализ включал проверку на случайность, однородность, соответствие теоретических и эмпирических кривых распределения вероятностей, корреляционный и регрессионный анализ. Методика статистического анализа изложена в [32]. Расчеты выполнены в пакете MS Excel.

Источники информации – опубликованные материалы государственного мониторинга поверхностных водных объектов и недр [35, 36], а также данные научных исследований, выполненных в ТПУ, ТФ ИНГГ СО РАН, АО «Томскгеомониторинг» в

1994–2020 гг. под руководством или при непосредственном участии авторов [31, 32, 37, 38]. Обобщение геохимических данных из разных источников выполнялось при условии выполнения работ в аккредитованных лабораториях и сопоставимости использованных методик пробоотбора (за основу приняты требования [4, 39]) и методов определения химического состава (более подробная информация изложена в [32, 40]).

#### Результаты исследования и их обсуждение

*Методика составления и анализа геохимического баланса водного объекта и его водосбора.* Анализ баланса вещества и энергии – основа для принятия управленческих решений в области использования и охраны водных ресурсов. Практическая реализация этого подхода заключается в составлении и анализе уравнений водного и геохимического баланса водного объекта, его водосбора или водохозяйственного участка [20, 24]. Первый этап – составление уравнения водного баланса с количественной оценкой источников водного питания. Решение этой задачи возможно на уровнях: 1) основных видов инженерных изысканий, проектирования КОС и мероприятий по мелиорации или рекультивации земель; 2) специальных видов инженерных изысканий и научных исследований.

На первом уровне рассматривается упрощенная математическая модель годового водного баланса с сосредоточенными параметрами в виде (мм/год):

$$H_r + H_{sn} - E_{wp} - E_{sp} - Y_s - Y_g \approx \Delta U, \quad (1)$$

где  $H_r$  и  $H_{sn}$  – атмосферные осадки в виде дождя и снега, мм/год;  $E_{wp}$  и  $E_{sp}$  – испарение с поверхности водосбора за холодный и теплый периоды;  $Y_s$  и  $Y_g$  – поверхностная и подземная составляющие суммарного водного стока  $Y$ ;  $\Delta U$  – изменение влагозапасов в водосборе. Основные допущения: 1) процессы формирования элементов водного баланса принимаются условно стационарными в рамках действующей версии нормативного документа по строительной климатологии [41]; 2) относительная погрешность определения элементов водного баланса при наличии измерений принимается 5 %, при использовании расчетных методов – 20 %; 3) величина  $\Delta U$  принимается для заболоченных равнинных территорий лесной (таежной) зоны Западной Сибири с заболоченностью водосбора более 20 % – 1 мм/год (средняя скорость вертикального прироста торфяной залежи [29]), а на прочих территориях – 0 мм/год.

Построение математической модели может быть проведено по следующему алгоритму: 1) определяется категория реки (большая, средняя, малая) и гидрографические характеристики реки и в ее водосбора с учетом требований [39, 42]; 2) согласно [19, 43], определяется среднееголетнее значение слоя годового водного стока  $Y_y$  (мм/год) для геометрического центра водосбора; если нет наблюдений за стоком, отсутствуют карты изолиний стока или однородных районов, то при наличии данных о среднееголетнем атмосферном увлажнении за год  $H_y$  и годовой сумме положительных температур приземных слоев

атмосферного воздуха  $\Sigma T_{>0}$  возможно применение следующих уравнений [44, 45]:

$$Y_y \approx a_0 \cdot \eta^{a_1} \cdot (f_{fr} + 1)^{a_2} \cdot (f_{mr} + 1)^{a_3} \cdot H_y \times \exp\left(-\frac{E_{lim}}{H_y}\right) \cdot \left(1 + \frac{Cv_H^2 \cdot E_y^2}{2 \cdot H_y^2}\right), \quad (2)$$

где  $E_{lim}$  – испаряемость (мм/год);  $f_{fr}$  – лесистость водосбора, %;  $f_{mr}$  – заболоченность водосбора, %;  $Cv_H$  – коэффициент вариации слоя атмосферного увлажнения;  $\eta$  – функция средней высоты водосбора  $Z_b$  (если  $Z_b > 500$ , то  $\eta = Z_b - 500$ , иначе  $\eta = 1$ );  $a_0, a_1, a_2$  – эмпирические коэффициенты; 3) согласно [19, 43], определяются границы сезонов гидрологического года, внутригодовое распределение водного стока и рассчитывается суммарный годовой подземный сток как сумма значений месячного подземного стока; месячный слой подземного стока  $Y_{g,i}$  за  $i$ -й месяц в среднем за многолетний период определяется приближенно по условию (3), а при наличии данных совместных наблюдений за расходами воды (в реке), уровнями речных и подземных вод – по регрессионным зависимостям вида (4), по структуре аналогичным уравнению Дюпюна с учетом функции инфильтрации:

$$Y_{g,i} \approx \begin{cases} Y_{g,we} + (Y_{g,wb} - Y_{g,we}) \cdot \frac{(i - we)}{(wb - we)}, & i \in [wb; we]; \\ Y_i, & i \in [wb; we], \end{cases} \quad (3)$$

$$Y_{g,i} = a_4 + a_5 \cdot (Z_{g,i}^2 - Z_{r,i}^2) + a_6 \cdot Z_{g,i}, \quad (4)$$

где  $Y_i$  – слой общего речного стока (мм/мес);  $wb$  и  $we$  – начало и конец зимнего периода согласно [43];  $Y_{wb}$  и  $Y_{we}$  – слой общего речного стока в начале и конце зимнего периода (мм/мес);  $Z_{g,i}$  и  $Z_{r,i}$  – среднемесячные значения уровней подземных и речных вод [6, 32]; поверхностная составляющая годового стока определяется как разница суммарного и подземного стока:

$$Y_{s,y} = Y_y - Y_{g,y}; \quad (5)$$

4) с учетом требований [20, 41] принимаются данные об атмосферных осадках, полученные: 4.1) для одной метеостанции в пределах одной природной зоны и водосбора малой или средней реки – для ближайшей метеостанции, расположенной не далее 100 км от геометрического центра водосбора; сумма осадков в среднем за год условно однородного многолетнего периода  $H_{IV-III}$  (слой, мм/год) определяется как сумма осадков за теплый  $H_{IV-XI} = H_r$  и холодный  $H_{XI-III} = H_w$  периоды; влагозапасы в снежном покрове  $H_{sn}$  принимаются равными  $H_{XI-III}$  и величине годовой водоотдачи из снежного покрова  $H_{sm}$ ; по этому же источнику принимаются среднемесячные значения температуры приземных слоев атмосферного воздуха и парциального давления водяного пара; 4.2) для двух и более метеостанций в пределах двух и более природных зон и водосбора средней или большой реки – как средневзвешенное для площадей водосбора; 5) при условии размещения исследуемого водосбора в лесной зоне и использовании климатических данных, полученных в поле, в значения суммарных влагозапа-

сов в снежном покрове по водосбору  $H_{sn}$  вводятся соответствующие поправки; 6) рассчитывается испарение с поверхности суши за  $i$ -й месяц со снежного покрова  $E_{wp,i}$  (мм/мес) в холодный период по формуле П.П. Кузьмина:

$$E_{wp,i} = 0,34 \cdot d_{a,i} \cdot N_i, \quad (6)$$

где  $d_{a,i}$  – среднемесячный дефицит влажности атмосферного воздуха (гПа);  $N_i$  – количество дней в месяце; суммарное испарение за холодный период  $E_{wp}$  определяется как сумма месячных значений, вычисленных по формуле (6); при отсутствии данных об измеренных месячных значениях  $d_{a,i}$  они рассчитываются согласно [5, 46]; 7) рассчитывается испарение с поверхности суши за теплый период  $E_{sp,y}$  (мм/год) по уравнению (1); если по каким-либо объективным причинам, указанным в [19], не удалось определить слой водного стока, то определяется: 7.1) годовое испарение с поверхности водосбора  $E_y$ ; 7.2) испарение за теплый период как  $E_{sp,y} = E_y - E_{wp,y}$ ; 7.2) годовой водный сток – по уравнению (1); остальные величины определяются так же, как указано выше (3)–(6). На втором уровне возможны различные варианты расчета [3, 6, 7, 9, 19, 45].

Уравнения геохимического баланса составляются на основе уравнения водного баланса для взвешенных и растворенных веществ с целью оценки величины стока и аккумуляции вещества, определяющих их процессов, пространственно-временных закономерностей изменения в замыкающем створе и в пределах исследуемого водосбора. Для расчета элементов геохимического баланса предварительно проводится районирование территории согласно [39] с выделением: 1) типа (по растительности), класса (по преобладающим почвам) и рода (по геоморфологическим условиям; наиболее простой случай – водораздел и долина ландшафтов); 2) площади водосбора в истоках реки без выраженной русловой сети  $F_U$ ; 3) доли участков совмещения речной сети и тектонических нарушений. В пределах каждого ландшафта проводится опробование коренных отложений, почв, растительности, снежного покрова, жидких атмосферных осадков, подземных и поверхностных вод, донных отложений поверхностных водных объектов с учетом рекомендаций [39]. При этом пробы подземных и поверхностных вод, донных отложений также отбираются на перспективных с точки зрения выявления геохимических аномалий участках, в том числе на: 1) территории водосбора в истоках реки без выраженной русловой сети и на территории с хорошо выраженной речной сетью; 2) участках максимальной сопряженности речной сети и тектонических нарушений с оценкой показателя  $\psi = P(rf) - P(r) \cdot P(f)$ , где  $P(r)$  – густота речной сети – отношение суммарной длины водотоков к площади водосбора  $F$ ,  $P(f)$  – отношение суммарной длины тектонических нарушений в пределах водосбора к его площади,  $P(rf)$  – отношение суммарной длины водотоков, совпадающих с тектоническими нарушениями (с учетом погрешности определения по карте) к площади водосбора; 3) малоприточных участках с относительно резким измене-

нием уклонов водной поверхности (выходы рек с горных районов на предгорную равнину, обширные участки с русловой многорукавностью). На указанных участках проводится отбор не менее 2–3 проб поверхностных вод, 2–3 проб донных отложений, 2–3 проб подземных вод. При проведении поисковых работ оценка геохимического состояния компонентов окружающей среды может быть выполнена только на указанных выше перспективных участках, что позволяет сократить затраты, по сравнению с используемой в настоящее время методикой, примерно на 20 % [47].

Величина выноса веществ  $G$  (взвешенных или растворенных) рассчитывалась путем умножения срочных значений концентрации вещества (в поверхностных водах –  $C_{Qs}$ , в подземных –  $C_{Qg}$ ) на расход воды (поверхностной составляющей –  $Q_s$ , подземной –  $Q_g$ ) и последующего определения статистических параметров [23], при отсутствии данных сопряженных наблюдений – как произведение средних значений концентрации вещества и расхода воды (объема атмосферных осадков). При этом уравнение геохимического баланса имеет следующий вид (т/год):

$$G_{Xr} + G_{Xs} - G_{Qs} - G_{Qg} \pm A \approx \Delta G, \quad (7)$$

где  $G_{Xr} \approx F \cdot C_r \cdot (H_r - E_{sp})$  и  $G_{Xs} \approx F \cdot C_{sn} \cdot (H_{sm} - E_{wp})$  – поступление исследуемого вещества с дождевыми и снеговыми осадками за вычетом испарения;  $F$  – площадь водосбора;  $C_r$  и  $C_{sn}$  – концентрации вещества в дождевых и снеготалых водах;  $G_{Qs}$  и  $G_{Qg}$  – вынос вещества с поверхностными и подземными водами;  $A$  – антропогенное влияние за счет сосредоточенного ( $A_{wsr}$ ) и диффузного ( $A_{wsd}$ ) поступления сточных вод за вычетом водозабора  $A_{wd}$ ;  $\Delta G$  – разница между приходами и выносом вещества из водосбора с учетом невязки. На основе анализа полученного уравнения геохимического баланса может быть проведена дифференциация веществ по генезису посредством оценки величины  $\varepsilon$  по уравнению (8) с учетом погрешностей определения по измерениям (5 %) и расчетом (20 %): менее 5 % – природного происхождения; больше или равно 5 % и меньше или равно 20 % – преимущественно природного происхождения; более 20 % – природно-антропогенного происхождения [32]:

$$\varepsilon = 100 \cdot (A_{wsr} + A_{wsd}) / (G_{Qs} + G_{Qg}). \quad (8)$$

В качестве примера рассмотрим среднепогодный геохимический баланс р. Ушайки в г. Томске (элемент речной системы: Ушайка–Томь–Обь; таблица). Эта река протекает по территориям Томского района и г. Томска – административного центра Томской области. Росгидромет, природоохранные органы Томской области, АО «Томскгеомониторинг» и ТПУ проводят наблюдения за качеством воды этой реки в устье ( $F=744 \text{ км}^2$ ), а ранее специалистами Росгидромета выполнялись измерения расходов воды на границе г. Томска в п. Степановки ( $F=713 \text{ км}^2$ ). Среднепогодный расход воды  $Q_{a,Cm}$  за 1975–1989 гг. в этом створе составил  $4,35 \text{ м}^3/\text{с}$ . Пересчетом по модулю стока получено среднее годовое суммарное значение в устье  $Q_{a,y}=4,54 \text{ м}^3/\text{с}$  (192,4 мм) и среднее (за год) значение подземной составляющей  $Q_{a,y}=0,7 \text{ м}^3/\text{с}$ . Ат-

мосферные осадки в Томске, согласно [41], составляют: в холодный период – 379 мм; в теплый – 180 мм. Испарение со снежного покрова по уравнению (6) составляет 22,7 мм.

Средний объем сброса сточных вод принят в размере  $10,301 \text{ млн м}^3$  (13,8 мм), объем забора воды (из реки без учета забора подземных вод из палеогенового горизонта) –  $0,322 \text{ млн м}^3$  (0,4 мм). Соответственно, испарение за год составляет 380 мм, а за теплый период – 357,3 мм. Масса и состав сброса ЗВ приняты по данным, приведенным в обзорах по экологическому состоянию [37], при этом масса ЗВ в забранной речной воде определена пропорционально поверхностной (84,6 %) и подземной (15,4 %) составляющей стока. Химический состав атмосферных осадков принят по [32]. Диффузные источники определены исходя из плотности населения (человек/км<sup>2</sup>) в г. Томске – 3034,8, в Томском районе – 8,87 (общее население в водосборе Ушайки – 100403 человека) и удельных показателей загрязнения согласно [21, 48]. Расчет диффузного поступления углерода  $OB_{C_{орг}}$  и сухого остатка (СО) проведен по региональным зависимостям от биохимического потребления кислорода (БПК<sub>5</sub>) и содержания хлоридов:  $C_{орг}=0,78 \cdot БПК_5 + 11,33$ ;  $R^2=0,89$ ;  $CO=1,66 \cdot Cl + 433,00$ ;  $R^2=0,96$ , где  $R^2$  – квадрат корреляционного отношения.

Анализ полученных результатов (таблица) позволяет предположить, что рассмотренные вещества по генезису могут быть разделены следующим образом: природно-антропогенные – растворенные соли по сухому остатку, хлориды, азот аммонийный, фосфаты, ОВ; преимущественно природные – сульфаты, нитриты, Fe, углеводороды; преимущественно природные – нитраты. Очевидно, что в р. Ушайку поступает большое количество взвешенных веществ и растворенных солей (их поступление может быть связано с противогололедной обработкой дорог), ОВ и продуктов их разложения, причем в основном неорганизованным способом с территории города. Следовательно, существует острая потребность в сборе и очистке снеготалого и дождевого стока с городской территории от взвешенных веществ, ОВ и продуктов их трансформации.

Связи между элементами геохимического и теплового балансов в различных природных зонах. В рамках выявления указанных взаимосвязей принят ряд допущений. Во-первых, предположим, что изменение концентрации вещества  $C$  в воде в зависимости от расхода воды  $Q$  в первом приближении описывается уравнением:

$$\frac{dC}{dQ} = \frac{k_C}{k_Q} \cdot \frac{C}{Q}, \quad (9)$$

где  $k_C$  и  $k_Q$  – значения удельной скорости изменения концентрации вещества и расхода воды соответственно. Если предположить, что отношение  $k_C/k_Q$  представлено в виде нелинейной функции (10), то результат интегрирования (9) – уравнение (11):

$$\frac{k_C}{k_Q} = a_7 + a_8 \cdot \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{a_9}, \quad (10)$$

$$\frac{c}{C_a} = \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{a_7} \cdot \exp\left(\frac{a_8}{a_9} \cdot \left(\left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{a_9} - 1\right)\right), \quad (11)$$

где  $a_7, a_8, a_9$  – эмпирические коэффициенты;  $C/C_a$  и  $Q/Q_a$  – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды;  $C_a$  и  $Q_a$  – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды, причем величина  $C_a$  аппроксимируется средним геометрическим значением  $C_g$  и рассматривается как фоновое значение  $C_b$  (геохимический фон), которое отражает условно равновесное состояние системы «вода–

порода» в статистически однородных условиях  $C_{Eq}$ . Геохимический фон тем выше, чем: 1) меньше интенсивность водообмена; 2) больше относительная площадь водосбора без выраженной русловой сети ( $F_U/F$ ); 3) теснее связь между размещением речной сети и тектонических нарушений (больше величина  $P(r.f) - P(r) \cdot P(f)$ ). Стандартное отклонение  $\sigma(C)$  возрастает при увеличении геохимического фона  $C_a$  и коэффициента вариации расходов воды  $Cv(Q)$ :

$$\sigma(C) \approx |a_7 + a_8| \cdot C_a \cdot Cv(Q). \quad (12)$$

**Таблица.** Среднегодовалый геохимический баланс водосбора р. Ушайки

**Table.** Average long-term geochemical balance of the river Ushayka basin

Показатель Indicator	$G_{Xr}$	$G_{Xs}$	$G_{Qs}$	$G_{Qg}$	$A_{wsr}$	$A_{wsd}$	$A_{wd}$	$\Delta G$	$\varepsilon, \%$
	т/год/tons/year								
Сухой остаток Total dissolved substances	821,8	2703,4	32523,1	12691,0	1118,2	16415,7	260,2	-24415,2	38,8
Хлориды/Chlorides	51,7	280,9	1395,0	695,4	132,4	329,8	11,2	-1306,8	22,1
Сульфаты/Sulphates	129,2	269,2	2654,2	509,9	56,7	161,2	21,2	-2569,0	6,9
Нитраты/Nitrates	0,2	114,7	342,0	383,9	25,8	–	2,7	-588,0	3,6
Нитриты/Nitrites	15,5	3,5	20,6	3,8	1,5	–	0,2	-4,0	6,2
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	15,4	67,4	200,6	28,8	15,6	293,2	1,6	160,6	134,6
P	0,7	5,3	7,9	6,4	1,3	40,3	0,1	33,3	290,6
Fe	1,8	10,5	57,5	4,7	6,0	–	0,5	-44,5	9,6
C <sub>орг.</sub> /Carbon of organic substances	24,2	175,5	975,1	240,4	16,3	1915,9	7,8	908,6	159,0
Нефтепродукты/Mineral oil	0,8	5,9	47,3	9,9	6,1	–	0,4	-44,9	10,6

Соответственно, на основе анализа структуры уравнения (11) можно предположить, что основные особенности химического состава вод формируются на стадиях формирования склонового, подповерхностного и подземного стока (на стадии руслового стока изменения химического состава вод также происходят, но уже в меньшей степени). Кроме того, изменчивость химического состава вод и повышенные концентрации ряда веществ будут чаще наблюдаться в условиях многолетней и внутригодовой изменчивости стока [33]. В свою очередь, с учетом уравнения (2), водный сток нелинейно зависит от климатических условий. В общем случае ожидается увеличение его изменчивости при продолжении наблюдаемого смещения границ гидрологических сезонов и некотором увеличении средней температуры атмосферного воздуха [45].

Во-вторых, предположим, что для совместного описания сорбции, растворения и осаждения в водном объекте может быть использовано уравнение (13):

$$\frac{dC}{dt} = \varphi_{ds} + \varphi_{srb} = k_{p0} \cdot (k_{p1} \cdot C_{Eq} - C) + k_s(S - k_c \cdot C) = \varphi_0 - k_r \cdot C, \quad (13)$$

$$k_r = k_{p0} + k_s \cdot k_m \cdot (S_m - S), \quad (14)$$

где  $t$  – координата времени;  $\varphi_{ds}$  и  $\varphi_{srb}$  – функции, описывающие процессы растворения–осаждения и сорбции–десорбции;  $\varphi_0$  – функция, слабо зависящая от времени и расхода воды  $Q$  в момент времени  $t$ ;  $C$  и  $S$  – концентрация исследуемого вещества в речных (болотных, подземных) водах и донных отложениях (водовмещающих минеральных грунтах и торфах);  $C_{Eq}$  – концентрация вещества в речных водах, соответствующая локальному равновесию в системе «вода–порода» и аппроксимируемая средним геометрическим

$C_g$  с учетом поправки на отклонение от равновесия из-за колебаний водности;  $S_m$  – максимальная сорбционная способность донных отложений;  $k_{p0}, k_{p1}, k_s, k_m$  – эмпирические коэффициенты. Тогда при допущении  $k_{rQ} = \frac{k_r}{k_Q} \approx const$  решением (13) является уравнение (15), описывающее отклонение некоторого устойчивого состояния при среднегодовом расходе воды  $Q_a$ :

$$C = C_e + (C_0 - C_e) \left(\frac{Q}{Q_a}\right)^{-k_{rQ}}, \quad (15)$$

$$C_e = \frac{k_s S + k_{p0} k_{p1} C_{Eq}}{k_r} = \frac{S + \frac{k_{p0}}{k_s} k_{p1} C_{Eq}}{\frac{k_{p0}}{k_s} + k_m (S_m - S)}, \quad (16)$$

$$S_e = \frac{k_s k_m S_m C + k_{p0} C - k_{p0} k_{p1} C_{Eq}}{k_s + k_s k_m C} = \frac{k_m S_m C + \frac{k_{p0}}{k_s} (C - k_{p1} C_{Eq})}{1 + k_m C}, \quad (17)$$

$$S_m = S_{m0} \cdot pH^{k_{pH}} \cdot \Pi(C_j^{k_j}), \quad (18)$$

где  $C_0$  – концентрация вещества в начальный момент времени, принимаемая равной  $C_g$ ;  $C_j$  – концентрация  $j$ -го вещества, влияющего на величину максимальной сорбционной способности  $S_m$ ;  $S_{m0}, k_j, k_{pH}$  – эмпирические коэффициенты; вид функции (18) принят с учетом [49];  $C_e$  и  $S_e$  – решения (13) при  $\frac{dC}{dt} = 0$  [50]. Близкие по виду решения могут быть получены и при упрощении стационарного уравнения диффузии с источниками вещества вида (13).

В результате анализа структуры модели (14)–(18) и результатов моделирования можно сделать вывод о том, что в целом уровень содержания вещества в речных, подземных и болотных водах определяется наличием доступного для взаимодействия вещества, сорбционной способности наносов, подстилающих и водовмещающих отложений, условно равновесной концентрацией вещества в одной среде, а также удельными скоростями растворения–осаждения и сорбции–десорбции в условиях рассматриваемого природно-территориального комплекса [50]. Практическое использование указанных выше связей между элементами водного геохимического балансов может заключаться в интерполяции пропусков и аппроксимации рядов геохимических наблюдений, а также в подборе объектов-аналогов, выбор которых проводится с учетом структуры уравнений (2), (11)–(18). В частности, у исследуемого объекта и аналога должны быть сопоставимы: при определении характеристик водного стока – лесистость, заболоченность, средняя высота водосбора, средние многолетние значения температура воздуха, парциального давления водяного пара и атмосферных осадков; при определении геохимических характеристик – норма и коэффициент вариации водного стока, минеральный и гранулометрический состав донных отложений, тип преобладающих русловых процессов, заболоченность водосбора.

*Количественные оценки направленности геохимических процессов и форм миграции химических элементов в водных объектах и их водосборах при изменениях климата и хозяйственной деятельности.* В связи с вводом в эксплуатацию в конце 1950-х гг. Новосибирского гидроузла произошло определенное снижение максимальных и увеличением минимальных уровней и расходов воды р. Оби на участке до устья р. Томи (значительная зарегулированность стока также характерна для р. Иртыша). На участках среднего и нижнего течения Оби влияние регулирования стока постепенно снижается. В целом годовой сток большинства притоков р. Оби в течение XX в. оставался статистически постоянным, но в ряде случаев отмечено некоторое увеличение стока зимней межени и смещение сроков наступления весеннего половодья на более ранние даты [32, 37].

В условиях избыточного увлажнения это приводит к опережающему увеличению влагозапасов водосборов относительно роста подземного стока и, как следствие, повышению уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны в таежной зоне (на территории Томской области среднее значение такого повышения за период после 1994 г., по сравнению с периодом с 1960-х гг., составляет 0,31 м). В свою очередь, это может вызвать дополнительное увеличение подземной составляющей речного стока в условиях нисходящего режима взаимодействия подземных и поверхностных вод. По результатам математического моделирования также сделан вывод о том, что после 1994 г. на участке среднего течения р. Оби также произошло уменьшение льдистости почвогрунтов в конце зимнего периода, увеличение их влажности в

апреле–мае, увеличение условно жидких атмосферных осадков и водоотдачи в апреле [45]. С учетом погрешностей определения гидрохимических показателей, относительного малого количества ежегодно отбираемых проб и колебаний сроков пробоотбора относительно фаз водного режима (как и собственно изменений этих границ) анализ многолетних изменений химического состава речных и подземных вод только по данным наблюдений мало эффективен.

Более объективными представляются результаты совместного анализа материалов наблюдений и связей между гидрологическими и геохимическими показателями. Использование данного подхода позволило сделать следующие выводы:

- 1) в течение периода с 1970 г. наблюдаются статистически неизменные среднемноголетние значения минерализации вод основных притоков р. Оби, но в долгосрочной перспективе, вследствие увеличения подземной составляющей (с более высокой минерализацией), возможно их некоторое увеличение; в таежной зоне в период с конца 1970-х гг. выявлено уменьшение дисперсии содержаний главных ионов в подземных водах верхней гидродинамической зоны в долинах больших рек и увеличение концентраций макрокомпонентов и их дисперсии – на участках с замедленным водообменном и интенсивным заболачиванием водосборов; статистически значимые однонаправленные изменения химического состава болотных вод не отмечены, но установлены различия внутриболотных экосистем в реакции на колебания атмосферного увлажнения [32, 40, 51];
- 2) в целом геохимический фон рек, болот и подземных вод, рассчитанный и как среднее геометрическое, и по [52], характеризуется превышением ПДК по величине ПО, бихроматной окисляемости (БО), рН, содержаниям Fe, Mn, Al, Cu,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , фенолов, нефтепродуктов хотя бы в одну из фаз водного режима в годы разной водности с вероятностью более 25 % [31, 32, 37]; нарушения геохимического фона на рассматриваемой территории неизбежны вследствие значительных внутригодовых изменений водного стока, определяющих в соответствии с (11), (12) значительный разброс и геохимических показателей;
- 3) с учетом структуры уравнения (2) и при сохранении тенденций к потеплению (с учетом уравнений (2), (11), (12)) вероятно увеличение дисперсии содержаний главных ионов и ряда микроэлементов, что согласуется с выводами, полученными для других регионов мира [53]; уровень содержания ОВ вследствие сильной заболоченности региона весьма высок в настоящее время и сохранится в долгосрочной перспективе с учетом прогрессирующего заболачивания водосборов многих притоков р. Оби (болота в долинах рек распространены не только в таежной зоне, но в лесостепной и горных районах);
- 4) влияние антропогенных факторов на эколого-геохимическое состояние речных, подземных и болотных вод в Западной Сибири проявляется в

- основном в формировании или увеличении интенсивности стока органических микропримесей типично антропогенного происхождения (например, алканы с четным количеством атомов углерода, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), хлорорганические соединения), легко-окисляемых ОВ по величине БПК<sub>5</sub>, неорганических соединений азота (в основном  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NO}_2^-$ ; высокие концентрации  $\text{NO}_3^-$  встречаются очень редко, в основном в местах несанкционированного размещения отходов или при нарушениях условий хранения химикатов) и связана, прежде всего, с выбросами ЗВ в атмосферный воздух и их диффузным поступлением с седиментных и производственных территорий; содержания  $\text{Cl}^-$  обычно значительно меньше ПДК, но их значения в 2–3 раза больше фоновых с большой вероятностью свидетельствуют о загрязнении вод [31, 32, 54]; антропогенное воздействие проявляется также в дополнительной аккумуляции в водных объектах взвешенных, коллоидных и растворенных форм некоторых металлов, которые в условиях отсутствия антропогенной нагрузки с большей вероятностью образовали бы минеральные формы [40];
- 5) уровень содержания вещества в поверхностных и подземных водах в целом определяется наличием доступного для взаимодействия вещества, сорбционной способностью подстилающих и водовмещающих отложений, условно равновесной концентрацией вещества в одной среде, а также удельными скоростями растворения–осаждения и сорбции–десорбции, характерных для рассматриваемых природно-территориальных комплексов; рост концентраций растворенных неорганических веществ в водах больших и средних рек ограничен относительно низкой растворимостью ряда соединений макрокомпонентов и сорбцией на частицах наносов и донных отложений [38, 50, 55];
  - 6) связи между химическим составом вод, подстилающих и водовмещающих грунтов существенно нелинейны и зависят от абсолютных и относительных характеристик интенсивности водообмена, заболоченности водосборных территорий и pH водной среды; абсолютное и относительное приращение концентраций в воде обычно меньше, чем соответствующее приращение концентраций в грунтах, что в целом обеспечивает устойчивость химического состава вод при малых и средних антропогенных нагрузках на водные объекты; высокие концентрации ряда химических элементов в воде могут быть связаны не только с наличием природных геохимических аномалий или загрязнением, но и с приближением фактической сорбции к максимально возможным значениям [50];
  - 7) распределение ряда химических элементов в водных и кислотных вытяжках из торфов, органоминеральных отложений (ОМО) и минерального грунта верхового болота (восточный участок Васюганского болота) в целом удовлетворительно объясняется функционированием в торфяной залежи двух природных барьеров, приуроченных к относительно резкому изменению фильтрационных свойств грунтов: верхнего (согласно терминологии [1] – окислительного, восстановительного, сульфидного и сорбционного гидроксидного), расположенного примерно в верхней части инертного горизонта; нижнего – щелочного карбонатного и гидrolитического, сорбционного гидроксидного, глинистого и карбонатного – в придонных слоях залежи; важную роль в формировании указанных барьеров играет болотная микрофлора [40];
  - 8) наиболее вероятный механизм перераспределения и трансформации вещества в речном водосборе в условиях Северной Евразии выглядит следующим образом: 8.1) при выпадении дождей и таянии снега активизируются водно-эрозионные процессы, в результате которых на спаде паводков и половодья на поверхности водосбора и в русловой сети аккумулируется значительное количество твердого вещества; 8.2) вследствие механических разрушений увеличивается суммарная площадь твердых частиц и, следовательно, площадь контакта с атмосферным воздухом, речными водами и верховодкой; соответственно, усиливается выщелачивание и растворение твердых частиц; 8.3) дополнительное выщелачивание и растворение твердых частиц может быть связано с поступлением ОВ в речную сеть с поверхностным стоком; 8.4) при увеличении температур атмосферного воздуха активизируются процессы фотосинтеза, сопряженные с временной аккумуляцией соединений С, Р, N, Si, причем важным источником вещества являются продукты водно-эрозионных процессов предыдущих этапов геохимического цикла; 8.5) при отмирании наземных и водных растений часть аккумулированных ранее веществ участвует в формировании почвенного покрова, часть выносится с водным стоком или поступает в атмосферный воздух; 8.6) и в том, и в другом случае эти вещества с большой вероятностью мигрируют в форме, отличающейся от исходной; в некоторых случаях происходит концентрирование веществ, например, осаждение гидроксидов  $\text{Fe}^{3+}$ , гуматов Са, Mg и ряда других металлов, фосфатов редкоземельных элементов [56].
- Методика оптимального выбора методов очистки сточных вод с учётом природных условий и характера хозяйственной деятельности.* С учетом определений [57], одной из важнейших составляющих охраны вод является очистка сточных вод/стоков – обработка сточных вод с целью разрушения или удаления из них определенных веществ. Очистка сточных вод предполагает использование методов механической, химической и биологической очистки и обеззараживания очищенных сточных вод. Согласно [57, 58], под механической очисткой понимаются технологические процессы очистки сточных вод механическими и физическими методами, под химической очисткой – процессы с применением реагентов, под биологической очисткой – процессы, основанные на способности биологических организмов разлагать ЗВ, под обеззараживанием сточных вод – обработка сточных

вод с целью удаления из них патогенных и санитарно-показательных микроорганизмов.

К сооружениям механической очистки, позволяющим выделить из стоков до 60 % взвешенных веществ, относятся решетки, сита, песколовки, отстойники и фильтры различных конструкций. Химическая очистка сточных вод включает нейтрализацию, окисление, восстановление, реагентные методы выделения ЗВ в виде малорастворимых и нерастворимых соединений. В ряде случаев выделяют физико-химические методы, применяемые при обработке производственных стоков и включающие в себя коагуляцию и флокуляцию, сорбцию, ионный обмен, экстракцию, различные электрохимические методы, мембранные методы (обратный осмос, ультрафильтрация). Биологическая очистка основана на функционировании биоты, которая минерализует и трансформирует растворенные ОВ, являющиеся источником их питания. Обычно сооружения биологической очистки разделяют на две группы – с искусственной и естественной (или близкой к ней) аэрацией. В последнем случае достаточно широкое распространение получили биологические пруды с высшей водной растительностью и поля орошения и фильтрации, в том числе поля орошения на торфяниках. Дезинфекция сточных вод является заключительным этапом их обработки перед сбросом в водный объект, но не последним в процессе в части охраны окружающей среды, поскольку требуется утилизация и размещение осадка (отходов производства), образующегося в процессе очистки и дезинфекции стоков [15–17, 48]. Выбор методов очистки сточных вод проводится с учетом: 1) характера и интенсивности источников поступления ЗВ в водные объекты; 2) возможности использования очищенных стоков и отходов очистки; 3) природных условий функционирования КОС; 4) возможности достижения в приемнике очищенных стоков установленных нормативов [14, 24, 48].

Ранее проведенный анализ работы КОС на территории Томской области [37] показал, что большая их часть (86 %) не обеспечивает достижение нормативных показателей качества сточных вод, причем наименьшая эффективность очистки наблюдается для: 1) соединений N и P; 2) Si, Fe и ОВ. Это свидетельствует о необходимости дополнительной доочистки стоков от продуктов разложения ОВ и учета природной специфики рассматриваемой территории, для которой характерна чрезвычайно высокая заболоченность, а следовательно, и высокое содержание ОВ природного генезиса,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ , Si, соединений Fe, Mn и ряда других элементов. Также можно сделать вывод о том, что в настоящее время тратятся непропорционально большие (относительно достигаемых результатов) средства на очистку хозяйственно-бытовых сточных вод от веществ, дефицит которых является фактором, ограничивающим развитие лесных фитоценозов на значительной части территории Томской области и ряда других регионов. Следовательно, в некоторых случаях целесообразно (с учетом прогрессирующей заболоченности) рассматривать возможность подачи очищенных сточных вод в боло-

та, использования болот или их участков для очистки хозяйственно-бытовых и ливневых сточных вод малых населённых пунктов и вахтовых посёлков, использования торфов как сорбентов и/или среды для функционирования микробиоценоза в целях очистки стоков от ОВ [59–61]. Аналогичные выводы можно сделать и по другим территориям Западной Сибири с учетом широкого распространения болот в речных долинах даже в лесостепной зоне.

Но при этом необходимо отметить, что результирующая оценка эффективности очистки стоков выполняется на основе условия:

$$\sum_{\text{ПДК}_j} \frac{C_{k,j}}{\text{ПДК}_j} = \sum_{\text{ПДК}_j} \frac{C_{b,j}}{\text{ПДК}_j} + \sum \frac{(C_{ws,j} - C_{b,j})}{n \cdot \text{ПДК}_j} \leq 1, \quad (19)$$

$$C_{k,j} = C_{b,j} + \frac{(C_{ws,j} - C_{b,j})}{n(k)}, \quad (20)$$

$$n(k) = \frac{C_{ws,j} - C_{b,j}}{C_{k,j} - C_{b,j}}, \quad (21)$$

где  $C_{k,j}$ ,  $\text{ПДК}_j$ ,  $C_{b,j}$ ,  $C_{ws,j}$  – концентрации  $j$ -го вещества фактическая (в контрольном створе), предельно допустимая, фоновая (в фоновом створе) и в очищенных сточных водах;  $n(k)$  – кратность разбавления в контрольном створе на расстоянии  $k$  от выпуска сточных вод. Очевидно, что при фоновой концентрации  $C_{b,j} \geq \text{ПДК}_j$  любые мероприятия не позволяют выполнить требование (19), (20), расчеты  $n$  (21) фактически ограничены случаем  $C_{k,j} > C_{b,j}$ , а при  $C_{ws,j} < C_{b,j}$  возможны случаи, когда отведение нормативно-чистых вод будет приводить к нарушению фонового состояния водного объекта, например, «промывке» болота, что неизбежно приведет к его разрушению и, следовательно, нарушению требований [62, ст. 57, п. 2]. Кроме того, даже при  $C_{ws,j} > C_{b,j}$ ,  $C_{k,j} > C_{b,j}$ ,  $C_{b,j} < \text{ПДК}_j$  условие (19) для  $M$  веществ выполняется только, если концентрация каждого вещества примерно в  $M$  раз меньше ПДК, что с учетом чувствительности используемых методов анализа для всего перечня нормируемых показателей фактически не достижимо. Принимая во внимание указанные ограничения, часть из которых может быть решена только на законодательном уровне, представляются целесообразными следующие рекомендации по проектированию КОС в Западной Сибири.

1. На первом этапе выполняется составление уравнений водного и геохимического балансов. При отсутствии данных наблюдений проводится анализ геохимического баланса водосбора объекта-аналога, выбранного с учетом структуры уравнений (2), (11), (12), (14)–(18). Если поступление неочищенных сточных вод менее 5 % стока, то строительство КОС нецелесообразно (если, конечно, речь не идет о сбросе микроорганизмов и токсичных веществ 1–2 класса опасности), но необходимо соблюдение требований [62] к водоохраным зонам (ВЗ) водного объекта – приемника стоков. В последнем случае процедура выделения ВЗ прямо указана в [62], но имеет место неопределенность в оценке береговой линии (границы водного объекта) при отсутствии данных наблюдений. Например, для рек и озер она опре-

- деляется «по среднемноголетнему уровню вод в период, когда они не покрыты льдом» [62, ст. 5, п. 4]. Однако, согласно [19, п. 5.45], «перенос уровней воды по продольному профилю водной поверхности производят в пределах небольших по длине речных участков (1–3 км) с учетом зависимости уклона от уровня в условиях установившегося потока», что определяет необходимость огромных затрат при оценке береговой линии поверхностных водных объектов в Западной Сибири (значительный объем затрат приходится на топогеодезические работы в поймах шириной от 1 до 18–20 км). Кроме того, практически утрачивается смысл выделения поймы – части дна речной долины, сложной наносами и периодически заливаемой в половодье и паводки [42, п. 161]. Выход из этой ситуации видится в соблюдении требований [62] к пойме, граница которой определяется условно по максимальному уровню воды обеспеченностью 10 % – расчетной обеспеченности для временных гидротехнических сооружений (ГТС) IV класса и ГТС IV класса, защищающих территории оздоровительно-рекреационного и санитарно-защитного назначения.
2. В ряде случаев (при обеспечении защиты подземных и поверхностных вод и соблюдении требований к зонам санитарной охраны) возможно строительство отстойника – усреднителя, функционирование которого происходит с учетом испарения стоков в теплый период года и вымораживания (со снижением концентрации ЗВ) в холодный [63–65]; последний фактор имеет важное значение на территориях распространения многолетней мерзлоты и/или перемерзания и пересыхания водотоков.
  3. Ключевыми задачами очистки стоков в условиях Западной Сибири являются: 3.1) осаждение взвешенных веществ как важного фактора снижения концентраций токсичных микроэлементов (Pb, Zn и др.); 3.2) уменьшение концентраций ОВ и биогенных веществ – продуктов трансформации ОВ [37]. Механическая очистка обеспечивает не только осаждение взвешенных частиц, но и соосаждение целого ряда токсичных элементов. Судя по материалам статистического анализа данных наблюдений и моделирования процессов взаимодействия речных вод и донных отложений, болотных вод и торфов [40, 50], связи между содержаниями Fe и ряда микроэлементов в поверхностных водах и донных отложениях или торфах удовлетворительно описываются уравнениями вида (14)–(18). Соответственно, на этапе механической очистки требуется контроль значений  $k_{rQ}$ ,  $S_{m0}$ ,  $k_{pH}$ , набора  $C_j$  и соотношения  $(S_m - S)$ . В частности, целесообразно обеспечить предварительную аэрацию стоков (перед или при подаче в отстойник), слабощелочную и щелочную среду в отстойнике, подбор материала дна отстойника с максимальными значениями  $S_{m0}$  и минимальную скорость движения сточных вод (в отстойнике) для увеличения интенсивности соосаждения растворенных, коллоидных и взвешенных форм токсичных элементов. В некоторых случаях отмечена зависимость  $S_m$  и от коэффициента шероховатости русла, в значительной степени связанного с гранулометрическим составом донных отложений.
  4. Как в целом для всего процесса очистки, так и при механической очистке размеры сооружений рассчитываются согласно [48], но в конечном случае определяются условием (19), в том числе величиной  $n(k)$ , зависящей в общем случае от соотношения расходов (объемов) сточных и поверхностных вод, условий перемешивания сточных вод и линейных размеров сооружений. В частности, расчет длины отстойника может быть уточнен (по сравнению с расчетом по [48]) путем использования регрессионных зависимостей, полученных на действующих сооружениях, метода расчета кратности разбавления в водоемах по М.А. Руффелю [24] или аналитических решений упрощенного стационарного уравнения диффузии [59].
  5. Равнинная территория Западной Сибири очень сильно заболочена. Заболочены и долины рек не только в таежной, но и в лесостепной зоне, причем речные долины очень часто достаточно широкие (более 2–3 км, а долина Оби – до 10–15 км и более), с большим количеством локальных понижений, дно которых сложено грунтами с низкими фильтрационными свойствами (слой суглинков и глин над толщей песков и галечника); с учетом этого в ряде случаев возможны и даже целесообразны варианты размещения отстойников в таких понижениях на границе с долинными болотами, при которых после необходимой инженерной подготовки (с целью предотвращения затопления объектов КОС и ликвидации гидравлической связи их с поверхностными и подземными водами) возводится система «сбор стоков – отстойник – блок дезинфекции – биопруд с аборигенной болотной растительностью – выпуск очищенных сточных вод»; аналогичные системы могут быть созданы и на границе водораздельных болот (или внутри болот на границе суходолов).
  6. Биологическую очистку стоков крупных населенных пунктов целесообразно проводить на сооружениях с искусственной аэрацией. Но для очистки талых вод снегоотвалов и поверхностного стока с городских территорий, доочистки (после биологических сооружений с искусственной аэрацией) и/или биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в слабо населенных районах целесообразно использовать сооружения с естественной аэрацией – биопруды, поля фильтрации и орошения [48, 60, 63, 66]. На заболоченных территориях Западной Сибири такие сооружения могут быть представлены биологическими прудами с торфяным субстратом и болотной растительностью, специально подготовленными (обвалованными, выбранными с учетом наличия водоупорных подстилающих пород, с искусственной кольматацией и гидроизоляцией грунтов основания сооружений) участками торфяных болот либо участками с минеральным грунтом, на которые

предварительно вносится торфяной грунт. Образующийся в процессе очистки стоков осадок может использоваться при рекультивации нарушенных земель в качестве органического удобрения [14, 67, 68]. После завершения эксплуатации КОС нарушенные земли подлежат рекультивации и в дальнейшем используются для лесохозяйственной деятельности; в целом в этом случае технология очистки стоков (преимущественно хозяйственно-бытовых) реализуется за счет сорбции ЗВ на частицах торфа, их усвоения растительностью и минерализации ОВ в процессе образования осадка [59, 60, 69].

7. Таким образом, оптимальная (по сочетанию эффективности очистки и соответствующих затрат) структура очистки сточных вод имеет вид: сбор стоков (в том числе, с вымораживанием и испарением) → механическая очистка (согласно [63], желательна – в многоступенчатых отстойниках) → биологическая очистка (в больших населенных пунктах – в сооружениях с искусственной аэрацией, в малых – в сооружениях с искусственной или естественной аэрацией; в последнем случае желательна многоступенчатая очистка и использование местных видов гидрофильной растительности) → доочистка от продуктов трансформации ОВ (в том числе, в сооружениях с естественной аэрацией) → дезинфекция → отстойник (в том числе, с вымораживанием и испарением) → сброс в водный объект или оборотную систему водоснабжения. Отстойники и сооружения с естественной аэрацией целесообразно совместить с естественными понижениями рельефа при условии инженерной защиты территории (обвалование, канализация дождевых и снеготалых вод, укрепление и гидроизоляция дна и берегов).

На стадии разработки нормативов допустимых сбросов (НДС) ЗВ и микроорганизмов необходимо выполнить расчет элементов геохимического баланса. Если НДС определен и утвержден в соответствии с действующим законодательством, а сброс очищенных сточных вод не превышает 5 % от стока водного объекта – приемника в замыкающем створе, то влияние сброса можно считать допустимым и локальным.

*Методика оптимального выбора способов восстановления нарушенных водных экосистем с учётом природных условий и характера хозяйственной деятельности.* Значительные по площади территории в Западной Сибири заняты промышленными объектами и полигонами отходов, которые по завершению эксплуатации, в соответствии с требованиями [70], должны быть рекультивированы. Под рекультивацией, согласно [71], понимается комплекс работ, направленных на восстановление продуктивности и хозяйственной ценности нарушенных и загрязненных земель, а также на улучшение условий окружающей среды. Эти работы обычно проводятся в два этапа (технический и биологический) с учетом природных и социально-экономических условий и состояния нарушенных земель.

В Западной Сибири, как уже указывалось выше, ключевой особенностью природных условий является очень сильная заболоченность территории, в том числе распространение верховых болот [30, 32]. При загрязнении таких болот в процессе добычи и транспортировки углеводородов процедура рекультивации обычно включает выравнивание поверхности, внесение удобрений и микробиологических препаратов, засев травянистыми (не болотными) растениями. В результате исходная экосистема обычно не восстанавливается, а происходит формирование достаточно устойчивой экосистемы, сходной с экосистемой низинного болота [32, 69]. Таким образом, эффективность восстановления загрязненных низинных болот указанным выше способом – достаточно спорный вопрос. При этом также отметим, что хозяйственная деятельность на заболоченных территориях в целом стимулирует болотообразование (прежде всего, низинных болот) за счет снижения интенсивности водообмена на объектах инфраструктуры и добычи углеводородов [32].

Анализ данных наблюдений и результатов моделирования распространения ЗВ в болотах Томской области показал, что: 1) в случае верховых болот заметное увеличение минерализации болотных вод обычно ограничено полосой до 200 м, но при этом вероятны структурные изменения болотных экосистем на участках протяженностью до 500 м; 2) низинные болота, по сравнению с верховыми, более устойчивы к воздействию систематического сброса сточных вод; 3) по глубине торфяной залежи заметное изменение химического состава болотных вод обычно приурочено к верхнему слою до 0,5–1,0 м с наибольшим проникновением (до 1,5–2,0 м и более) соленоватых и соленых сточных вод; разовые поступления нефти часто приводят к загрязнению торфяной залежи на меньшую глубину [69, 72–74].

Предположим, что в некоторой точке произошел аварийный сброс нефти с плотностью  $0,8 \text{ т/м}^3$ . Тогда при коэффициенте фильтрации  $0,0005\text{--}0,004 \text{ см/с}$  и угле  $0,005\text{--}0,008 \text{ м/м}$  (принято по [75]) ее распространение в деятельном слое торфяной залежи глубиной  $0,5 \text{ м}$  из центра круга радиусом  $200 \text{ м}$  (указанная выше протяженность заметного загрязнения болотных вод) до границы круга с фоновыми значениями углеводородов будет происходить, как минимум, несколько лет, а масса нефти, ограниченная конусом максимального распространения, составит  $16755 \text{ т}$ . При коэффициенте скорости самоочистки около  $0,3 \text{ сут}^{-1}$  (принято по [21]) за время фильтрации нефти в торфяном болоте произойдет снижение ее концентрации в болотных водах до фонового уровня даже в центре круга. С учетом даже такого грубого приближения (но подтвержденного наблюдениями и результатами моделирования [72, 74]) можно сделать вывод о том, что при разовом аварийном сбросе на верховое болото нефти в размере до  $16\text{--}17 \text{ т}$  проведение его рекультивации нецелесообразно, поскольку, во-первых, рекультивация приведет не к восстановлению исходного состояния, а к созданию природно-антропогенного объекта, сходного с низинным боло-

том. Во-вторых, в течение 3–5 лет (срок, соответствующий действию нормативов допустимого воздействия на компоненты окружающей среды) состояние загрязненного верхового болота вернется к исходному за счет процессов самоочищения.

При более значительном разливе нефти (в том числе многократном в течение 3–5-летнего периода) как на верховых, так и на низинных или переходных болотах, либо при авариях в системе поддержания пластового давления (ППД) рекультивация, безусловно, нужна [69]. Но при ее проведении на техническом этапе следует стремиться не к полному выравниванию поверхности, а к имитации исходного болотного микроландшафта. В частности, как было показано в [76], для функционирования выпуклых верховых болот важно, чтобы сохранялась возможность «канализации» отходов жизнедеятельности болотной микрофлоры и токсичных веществ (в восточной части Васюганского болота –  $\text{NO}_2^-$  и Al). Внесение питательного субстрата (например, соединений Ca и P) также целесообразно проводить неравномерно, например, в пределах грядово-мочажинного комплекса (ГМК) – в виде гряд, расположенных перпендикулярно вектору распространения болотных вод. При рекультивации болот, загрязненных в результате аварий в системе ППД, желательнее засеивать восстанавливаемый участок не луговыми травянистыми растениями, а видами растительности, характерными для низинных болот лесостепи и южной тайги. Такие виды изначально приспособлены к достаточно резким колебаниям минерализации водопритока (от ультрапресных снеготалых вод в весенний период до солоноватых подземных вод, поступающих в притеррасные понижения в зимний).

В целом рекультивация нарушенных земель в любых природных зонах Западной Сибири должна проводиться в последовательности: 1) выявление характерных природных условий; 2) восстановление нарушенных земель для заданного вида землепользования при [68, 69, 77]: 2.1) условии, что невозможно самовосстановление в течение 3–5 лет; 2.2) максимальном приближении к местным условиям и с максимально возможным использованием местных материалов и видов растительности; 3) организация водоотведения с рекультивируемого участка для предотвращения эрозионных процессов, а также не предусмотренного проектом рекультивации затопления и/или подтопления; 4) мониторинг состояния компонентов окружающей среды в центральной части участка и в створах фактического или возможного выноса с него. По результатам инженерных изысканий, выполненных до проведения работ, повлекших нарушение земель, и мониторинга рекультивированного участка необходимо выполнить расчет элементов геохимического баланса. Если значения элементов геохимического баланса до нарушения земель и после их рекультивации отличаются не более чем на 20 %, участок может считаться восстановленным. В случае отсутствия исходной информации рекомендуется сравнение с геохимическим балансом ненарушенного участка с аналогичными природными условиями.

### Заключение

В результате исследования предложена методология управления геохимическим балансом водосборной территории, заключающаяся в: 1) оценке состояния водных объектов, тенденций его изменения и антропогенного влияния; 2) построении комплекса математических моделей, описывающих формирование водного стока и химического состава вод при минимуме исходной информации; 3) разработке мероприятий, позволяющих минимизировать антропогенное влияние на водные объекты на основе выбора наиболее эффективных способов очистки сточных вод и внедрения водоохраных технологий с учетом региональных условий (заболоченность равнинной территории и долин больших рек) и максимальным использованием местных материалов; 4) оценке эффективности водоохраных мероприятий путем сравнения результатов наблюдений и моделирования.

Разработан алгоритм определения элементов водного и геохимического баланса водосбора (1), (7). Для оценки элементов уравнений баланса и определения параметров водоохраных мероприятий рассмотрены модели (1), (11), (12), (14)–(18), описывающие связи между химическим составом поверхностных и подземных вод, подстилающих и водовмещающих грунтов и интенсивностью водообмена. На основе анализа геохимического баланса водосборов и указанных моделей охарактеризована направленность геохимических процессов в водных экосистемах Западной Сибири и сформулированы ключевые аспекты выбора методов очистки сточных вод и рекультивации нарушенных земель.

Начальным этапом проектирования КОС и рекреационных работ должны быть составление и анализ водного и геохимического баланса водосборной территории. Строительство очистных сооружений целесообразно, если сброс неочищенных сточных вод составляет более 5 % от стока в замыкающем створе водосбора, либо сточные воды содержат опасные микроорганизмы и токсичные вещества 1–2 классов опасности. В случае принятия решения о строительстве КОС оптимальная (по сочетанию эффективности очистки и соответствующим затратам) структура очистки сточных вод предполагает широкое использование отстойников и сооружений биологической очистки с естественной аэрацией, которые желательнее совместить с естественными понижениями рельефа в долинах рек или внутри болот на границе суходолов при условии инженерной защиты территории (обвалование, канализация дождевых и снеготалых вод, укрепление и гидроизоляция дна и берегов). В случае нецелесообразности строительства КОС рекомендуется соблюдение требований к ВЗ для части речной долины, затапливаемой при максимальных уровнях воды обеспеченностью 10 %.

Рекультивацию нарушенных земель целесообразно проводить при невозможности самовосстановления в течение 3–5 лет и при условии максимального приближения к местным природным условиям. Рекультивация загрязненного участка верхового болота

(в Западной Сибири) при аварийном сбросе нефтепродуктов массой до 16–17 т неэффективна. Завершающим этапом строительства КОС и рекультивации нарушенных земель является повторное составление и анализ геохимического баланса водосбора (в случае очистных условий – одновременно с разработкой нормативов допустимых сбросов). Если сброс очищенных сточных вод не превышает 5 % стока в замыкающем створе, то влияние сброса можно считать

допустимым и локальным. Если значения элементов геохимического баланса до нарушения земель (при отсутствии исходной информации – на фоновом участке-аналоге) и после их рекультивации отличаются не более чем на 20 %, то участок может считаться восстановленным.

*Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-55-80015, 17-05-00042.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
2. Loucks D.P., Van Beek E. Water resources systems planning and management. An Introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. – 679 p.
3. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и массообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
4. Manual on Stream Gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
5. Manual on Stream Gauging. V. II. Computation of Discharge. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.
6. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
7. Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. Floods in a changing climate. Hydrologic modelling. – New York: Cambridge University Press, 2012. – 177 p.
8. Benedini M., Tsakiris G. Water quality modelling for rivers and streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
9. СТО ГГИ 52.08.37-2015. Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу средних многолетних изменений. – СПб.: ART-XPRESS, 2015. – 40 с.
10. Никаноров А.М. Гидрохимия и методы исследования качества вод суши. МПР РФ, Росгидромет. – Ростов-на-Дону: ФГБУ «ГХИ», ИВП РАН, 2017. – 572 с.
11. Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения. – М.: Наука, 2003. – 352 с.
12. Danilov-Danilyan V.I., Khranovich I.L. A system of mathematical models underlying water use and disposal strategies // Water Resources. – 2018. – V. 45. – № 2. – P. 289–296.
13. Venitsianov E.V. Modern problems of water protection in Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 321. – P. 1–8. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012033.
14. Справочник по современным технологиям очистки природных и сточных вод и оборудованию. – Copenhagen: Ministry of Environment and Energy, Danish Environment Protection Agency, Printed by Schultz Grafisk, 2001. – 253 с.
15. ИТС 8-2015. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – М.: Росстандарт, 2015. – 77 с.
16. ИТС 10-2015. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. – М.: Росстандарт, 2015. – 359 с.
17. ИТС 15-2016. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом (сжигание отходов)). – М.: Росстандарт, 2016. – 139 с.
18. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective / G. Blöschl, G. Carr, J. Salinas, B. Széles, M.H. Barendrecht, K. Breinl, D. Duethmann, H. Müller-Thomy, R. Tong, M.F.P. Bierkens, R. van Beek, R.J. van der Ent, A. Chambel, C. Cudennec, G. Destouni, Z. Kalantari, A. Fiori, E. Volpi, J.W. Kirchner, S.T. Allen et al. // Hydrological Sciences Journal. – 2019. – V. 64. – № 10. – P. 1141–1158.
19. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
20. Методика расчета водохозяйственного баланса водных объектов. – М.: МПР России, 2007. – 41 с.
21. Справочник по гидрохимии / под ред. А.В. Никанорова. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 391 с.
22. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
23. РД 52.24.748-2010. Усовершенствованная методика определения выноса (переноса) загрязняющих веществ с речным стоком. Росгидромет. – Ростов-на-Дону: ГУ «ГХИ», 2010. – 65 с.
24. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей (с изменениями от 31.07.2018 г.). – М.: МПР России, 2018. – 35 с.
25. Моисеенко Т.И. Биодоступность и экотоксичность металлов в водных системах: критические уровни загрязнения // Геохимия. – 2019. – Т. 64. – № 7. – С. 675–688. DOI: 10.31857/S0016-7525647675-688.
26. Давыдова М.И., Раковская Э.М., Тушинский Г.К. Физическая география СССР. – Т. 1. – М.: Просвещение, 1989. – 240 с.
27. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: МГУ, 1998. – 376 с.
28. Адам А.М. Оценка экологического состояния территории Западной Сибири в целях обеспечения экологической безопасности в контексте устойчивого природопользования // Охрана природы: сборник статей. – Томск: НТЛ, 2005. – С. 1–12.
29. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. – Томск: ИОА СО РАН, 2002. – С. 174–186.
30. Eurasian mires of the southern Taiga belt: modern features and response to Holocene Palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies. V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
31. Эколого-геохимическое состояние поверхностных водных объектов в таежной зоне Западной Сибири и некоторые вопросы нормирования антропогенной нагрузки / О.Г. Савичев, М.Л. Марков, Т.М. Потапова, О.В. Задонская // Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития: Труды III Всерос. конф. – СПб.: Химиздат, 2019. – С. 754–757.
32. Савичев О.Г. Водные ресурсы Томской области. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2010. – 248 с.
33. Savičev O.G., Zemtsov V.A., Pasechnik E.Y. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters // Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 232. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/232/1/012012.
34. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
35. Водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество. 2017 год. – СПб.: Росгидромет, 2018. – 153 с.
36. Состояние геологической среды (недр) на территории Сибирского федерального округа в 2017 г. Информационный бюллетень. / под ред. В.А. Лыготина. – Томск: Филиал «Сибир-

- ский региональный центр ГМСН», ФГБУ «Гидроспецгеология», 2018. – Вып. 14. – 178 с.
37. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000–2005 гг. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», «АГРАФ-ПРЕСС», 2006. – 88 с.
38. Гусева Н.В. Механизмы формирования химического состава природных вод в различных ландшафтно-климатических зонах горно-складчатых областей центральной Евразии: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 43 с.
39. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
40. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia) / O. Savichev, E. Soldatova, M. Rudmin, A. Mazurov // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 113. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
41. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. – М.: Стандартинформ, 2019. – 153 с.
42. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 47 с.
43. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. – СПб.: Нестор-История, 2009. – 193 с.
44. Моисеева Ю.А. Изменения подземного стока таежной зоны Западной Сибири в голоцене: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2018. – 22 с.
45. Савичев О.Г., Лыготин В.А., Моисеева Ю.А. Условия изменения уровней подземных вод верхней гидродинамической зоны на территории томской области // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геохронология*. – 2018. – № 6. – С. 31–40. DOI: 10.1134/S0869780318060054.
46. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements / R.G. Allen, L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith // *FAO Irrigation and drainage. Water Resources, Development and Management Service FAO*. – 1998. – № 56. – P. 1–276.
47. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / Nguyen Van Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Quach Duc Tin // *Vietnam Journal of Earth Sciences*. – 2017. – № 39 (2). – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
48. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85. – М.: Минрегион России, 2011. – 84 с.
49. Levy J., Chesters G. Simulation of atrazine and metabolite transport and fate in a sandy-till aquifer // *Journal of contaminant hydrology*. – 1995. – № 20. – P. 67–88.
50. Савичев О.Г. Исследование взаимосвязей между химическим составом вод и донных отложений рек Сибири // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 178–188. DOI: 10.18799/24131830/2019/5/280.
51. Камнева О.А. Многолетние изменения гидрогеологических условий Среднеобского бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 20 с.
52. РД 52.24.622-2017. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов сбросов сточных вод. Дата введения 14.06.2017 г. – М.: Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2017. – 96 с.
53. Climate change impact on residual contaminants under sustainable remediation / A. Libera, F.P.J. de Barros, V. Faybishenko, C. Eddy-Dilek, M. Denham, K. Lipnikov, D. Moulton, B. Maco, H. Wainwright // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2019. – V. 226. – P. 1–12. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2019.103518.
54. Влияние высокоминерализованных вод на почвенно-растительный покров в районах нефтедобычи / А.Е. Березин, В.А. Базанов, Т.А. Минеева, Л.А. Березина // *Вестник Томского государственного университета*. – 2008. – № 306. – С. 142–148.
55. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere / B. Robinson, N. Bolan, S. Mahimairaja, B. Clothier // *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation* / Ed. by M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. – New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 97–110.
56. Домаренко В.А., Савичев О.Г., Улаева С.С. Геохимический баланс водосбора малой реки Ильбокич (бассейн Ангары, Средняя Сибирь) // *Разведка и охрана недр*. – 2019. – № 7. – С. 35–42.
57. ГОСТ 17.1.1.01-77. Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 30 с.
58. ГОСТ 25150-82. Канализация. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 13 с.
59. Parameter calculation technique for the waste treatment facilities using naturally-aerated blocks in the bog ecosystems / K.V. Akhmed-Ogly, O.G. Savichev, O.G. Tokarenko, E.Yu. Pashchnik, M.V. Reshetko, N.G. Nalivajko, M.V. Vlasova // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2014. – V. 21. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012021.
60. Процуос О.А., Михайлов А.В. Опыт применения технологии торфяной фильтрации для очистки поверхностных сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2019. – № 3. – С. 34–39.
61. Corzo A., Sanabria O. Adaptation of vegetation in high-rate constructed wetland using artificial carriers for bacterial growth: Assessment using phytopathological indicators // *Journal of Water Process Engineering*. – 2019. – V. 32. – P. 1–8. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100974.
62. Водный кодекс Российской Федерации. От 03.06.2004 № 74-ФЗ. С изменениями на 03.08.2018 г. – М.: Кремль, 2018. – 48 с.
63. Жуков А.И., Монгайт И.Л., Родзиллер И.Д. Методы очистки производственных сточных вод. – М.: Стройиздат, 1977. – 204 с.
64. Сосновский А.В. Применение природного холода для очистки и опреснения солёных вод // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. – 2018. – № 6 (198). – С. 38–41.
65. Randall D.G., Nathoo J. Resource recovery by freezing: a thermodynamic comparison between a reverse osmosis brine, sea water and stored urine // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2018. – № 26. – P. 242–249. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.10.020.
66. Polyakova O.S., Semyonov S.Yu. Reconstruction experience of the wastewater treatment plant (Kargasok village, Tomsk region, Russia) using «constructed wetlands» technology // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – V. 400. – P. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/400/1/012020.
67. Кофман В.Я. Современные способы удаления азота из сточных вод (обзор) // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2019. – № 5. – С. 44–52.
68. Kuznetsova I.V., Timofeeva S.S. Green technologies in land recultivation for coal mining enterprises // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2020. – V. 408. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012075.
69. Березин А.Е., Паршина Н.В. Щадящие методы рекультивации земель на заболоченных территориях // *Почвы в биосфере. Матер. Всерос. научн. конф.* / отв. ред. А.И. Сысо. – Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. – С. 303–307.
70. Российская Федерация. Законы. Об охране окружающей среды: федер. закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (с изменениями на 29.07.2018). – М.: Кремль, 2018. – 77 с.
71. ГОСТ 17.5.1.01-83. Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения. Дата введения 1984-07-01 // *Охрана природы. Земли: Сб. ГОСТов*. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 8 с.
72. Прогноз изменения макрокомпонентного состава болотных вод при добыче железных руд в Томской области / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, Н.В. Гусева, В.А. Домаренко, А.А. Хвачевская // *География и природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 94–102.
73. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia / W. Bleuten, E. Lapshina, W. Ivens, V. Shinkarenko, E. Wiersma // *International Peat Journal*. – 1999. – № 9. – P. 73–82.
74. Влияние шламовых амбаров на геохимическое состояние болотных экосистем в бассейне реки Васюган / В.А. Базанов, О.Г. Савичев, Д.В. Волостнов, Б.А. Егоров, А.О. Крутовский, Е.Г. Язиков // *Известия Томского политехнического университета*. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 72–75.
75. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 280 с.

76. Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов, В.А. Базанов, Н.В. Гусева, А.А. Хвашевская, Н.Г. Наливайко // Известия РАН. Серия географическая. – 2016. – № 5. – С. 60–69. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-5-60-69.
77. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. Ecosystem dynamics. From the past to the future. – Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2014. – 321 p.

*Поступила 17.02.2020 г.*

#### **Информация об авторах**

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Гусева Н.В.**, доктор геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой – руководитель отделения геологии на правах кафедры Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 502.2: 556.18

## METHODOLOGY OF MANAGEMENT OF RIVER BASINS GEOCHEMICAL BALANCE IN WESTERN SIBERIA

Oleg G. Savichev<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Natalya V. Guseva<sup>1</sup>,  
Guseva24@yandex.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance** of the research is determined by a plenty of unresolved issues on estimation of water bodies condition and their long-term forecast, normalization of anthropogenous influences, sewage treatment and restoration of water bodies.

**The aim** of the research is to develop a methodology for management of geochemical balance of water ecological systems in Western Siberia in various natural and anthropogenous conditions.

**Methods:** landscape and geochemical, geographical and hydrological, statistical methods, methods of mathematical modelling of a water flow and chemical composition of waters.

**Results and conclusions.** The authors have proposed the methodology of management of river basin geochemical balance. It consists in: 1) estimation of of water bodies condition, tendencies of its change and anthropogenous influence; 2) construction of a complex of mathematical models describing water runoff formation and chemical composition of waters; 3) development of the actions, which allow minimizing anthropogenous influence on water bodies; 4) estimation of water-security actions efficiency by comparison of results of observations and simulating. The authors developed the algorithm for defining the elements of geochemical balance of river basins and characterized the orientation of geochemical processes in water bodies in Western Siberia. The key aspects of a choice of methods of sewage treatment and restoration of the broken areas are formulated. It is shown that construction of treatment facilities is reasonable if dump of the crude sewage makes more than 5 % from a runoff in closing section. The optimum structure of sewage treatment assumes wide use of sediment basins and constructions of biological clearing with natural aeration which are desirable for combining with natural downturn of a relief in river valleys or inside bogs for condition of engineering protection of territory. Restoration can be considered effective if the difference between values of elements of balance before infringement and after restoration does not exceed 20 %.

### Key words:

Water and geochemical balance, river basins, management of geochemical balance, Western Siberia, boggy territories.

The research was financially supported by the RFBR grants no. 18-55-80015, 17-05-00042, 18-00-01493.

### REFERENCES

- Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
- Loucks D.P., Van Beek E. *Water resources systems planning and management. An introduction to methods, models and applications*. Turin, UNESCO Publishing, printed by Ages Arti Grafiche, 2005. 679 p.
- Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i massoobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy* [Modelling of heat and mass transfer of the land surface to the atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
- Manual on Stream Gauging*. Vol. I. Fieldwork. WMO-No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
- Manual on Stream Gauging*. Vol. II. Computation of Discharge. WMO-No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 198 p.
- Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford, New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
- Mujumdar P.P., Nagesh Kumar D. *Floods in a changing climate. Hydrologic modelling*. New York, Cambridge University Press, 2012. 177 p.
- Benedini M., Tsakiris G. *Water quality modelling for rivers and streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
- STO HSI 52.08.37-2015. *Vlagozapasy i promerzaniye pochvy, isparenije s pochvy i vodnoy poverkhnosti pri regionalnom izmenenii klimata. Rekomendatsii po raschetu i prognozu srednikh mnogoletnikh izmeneniy* [Moisture and soil freezing, evaporation from soil and water surface with regional climate change. Recommendations for calculating and forecasting average multi-year changes]. St-Petersburg, ART-XPRESS, 2015. 40 p.
- Nikanorov A.M. *Gidrokimiya i metody issledovaniya kachestva vod sushi* [Hydrochemistry and land water quality research methods]. Rostov-on-Don, FSBO «HCSI», IWP RAS, 2017. 572 p.
- Ratkovich D.Ya. *Aktualnye problemy vodoobespecheniya* [Actual problems of water supply]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 352 p.
- Danilov-Danilyan V.I., Khranovich I.L. A system of mathematical models underlying water use and disposal strategies. *Water Resources*, 2018, vol. 45, no. 2, pp. 289–296.
- Venitsianov E.V. Modern problems of water protection in Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 321, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/321/1/012033.
- Spravochnik po sovremennym tekhnologiyam ochistki prirodnykh i stochnykh vod i oborudovaniyu* [Handbook of modern technologies for the treatment of natural and waste water and equipment]. Copenhagen, Ministry of Environment and Energy, Danish Environment Protection Agency, Printed by Schultz Grafisk, 2001. 253 p.
- ITS 8-2015. *Informatsionno-tekhnicheskiy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Ochistka stochnykh vod pri proizvodstve produktii (tovarov), vypolnenii rabot i okazanii uslug na krupnykh predpriyatiyakh. Wastewater treatment in manufacture* [Information and technical reference on the best available technologies. Wastewater treatment in the production of products, work and services in large enterprises. Wastewater treatment in manufacture of products, performance of works and provision of services in large enterprises]. Moscow, Rosstandart Publ., 2015. 77 p.
- ITS 10-2015. *Informatsionno-tekhnicheskiy spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam. Ochistka stochnykh vod s ispolzovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poseleniy, gorodskikh okrugov* [Information and technical reference on the best available technologies. Wastewater treatment using centralized drainage systems of settlements, urban districts]. Moscow, Rosstandart Publ., 2015. 359 p.

17. ITS 15-2016. *Informatsionno-tekhnicheskiiy spravochnik po nailuchshim dostupnyim tekhnologiyam. Utilizatsiya i obezvrezhivaniye otkhodov (krome obezvrezhivaniya termicheskim sposobom (szhiganiye otkhodov). Recycling and disposal of waste (except for thermal disposal of waste (waste incineration))* [Information and technical reference on the best available technologies. Recycling and disposal of waste (except for thermal disposal of waste (waste incineration)]. Moscow, Rosstandart Publ., 2016. 139 p.
18. Blöschl G., Carr G., Salinas J., Széles B., Barendrecht M.H., Breinl K., Duethmann D., Müller-Thomy H., Tong R., Bierkens M.F.P., van Beek R., van der Ent R.J., Chambel A., Cudennec C., Destouni G., Kalantari Z., Fiori A., Volpi E., Kirchner J.W., Allen S.T. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 2019, vol. 64, no. 10, pp. 1141–1158.
19. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
20. *Metodika rascheta vodokhozyaystvennogo balansa vodnykh obektov* [Methodology for calculating the water balance of water bodies]. Moscow, MPR of Russia Publ., 2007. 41 p.
21. *Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook of hydrochemistry]. Ed. by A.V. Nikanorov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 391 p.
22. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
23. RD 52.24.748-2010. *Usovershenstvovannaya metodika opredeleniya vynosa (perenos) zagryaznyayushchikh veshchestv s rechnym stokom* [An improved methodology for determining the removal (transfer) of pollutants with river runoff]. Rostov-on-Don, Roshydromet, FSBO «GHI», 2010. 65 p.
24. *Metodika razrabotki normativov dopustimyykh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnyye obekty dlya vodopolzovateley* [Methodology for developing standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users]. 31.07.2018. № 342. Moscow, Ministry of Nature Resources of Russia Publ., 2018. 35 p.
25. Moiseenko T.I. Bioavailability and ecotoxicity of metals in aqueous systems: critical levels of pollution. *Geochemistry*, 2019, vol. 64, no. 7, pp. 675–688. In Rus. DOI: 10.31857/S0016-7525647675-688.
26. Davydova M.I., Rakovskaya E.M., Tushinskiy G.K. *Fizicheskaya geografiya SSSR* [Physical geography of the USSR]. Moscow, Prosveshcheniye Publ., 1989. Vol. 1, 240 p.
27. Solntseva N.P. *Dobycha nefi i geokhimiya prirodnykh landshaftov* [Oil production and geochemistry of natural landscapes]. Moscow, Moscow State University Publ., 1998. 376 p.
28. Adam A.M. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya territorii Zapadnoy Sibiri v tselyakh obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti v kontekste ustoychivogo prirodnopolzovaniya [Assessment of the ecological state of the territory of Western Siberia in order to ensure environmental safety in the context of sustainable nature management]. *Okhrana prirody* [Nature Protection]. Tomsk, NTL Publ., 2005. pp. 1–12.
29. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
30. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian mires of the southern Taiga belt: modern features and response to Holocene Palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. Vol. 190, pp. 315–341.
31. Savichev O.G., Markov M.L., Potapova T.M., Zadonskaya O.V. Ekologo-geokhicheskoe sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh obektov v taezhnoy zone zapadnoy Sibiri i nekotorye voprosy normirovaniya antropogennoy nagruzki [The ecological and geochemical state of surface water bodies in the taiga zone of western Siberia and some issues of normalizing the anthropogenic load]. *Gidrometeorologiya i ekologiya: dostizheniya i perspektivy razvitiya. Trudy III Vserossiyskoy konferentsii* [Proceedings of the III Russian Conference. Hydrometeorology and Ecology: Achievements and Development Prospects]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2019. pp. 754–757.
32. Savichev O.G. *Vodnye resursy Tomskoy oblasti* [Water resources of the Tomsk region]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2010. 248 p.
33. Savichev O.G., Zemtsov V.A., Pasechnik E.Y. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters. *Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 232, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/232/1/012012.
34. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
35. *Vodny kadastr. Resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, ikh ispolzovaniye i kachestvo. 2017 god* [Water cadastre. Surface and groundwater resources, their use and quality. 2017 year]. St. Petersburg, Roshydromet Publ., 2018. 153 p.
36. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Sibirskogo federalnogo okruga v 2017 g.* Informatsionnyy byulleten [A condition of the geological environment (subsoil) in the territory of Siberian Federal District in 2017]. Ed. by V.A. Lgotin. Tomsk, Filial «Sibirskiy regionalnyy tsentr GMSN», FGBU «Gidrospegeologiya» Publ., 2018. Iss. 14, 178 p.
37. Lgotin V.A., Savichev O.G., Nigorozhenko V.Ya. *Sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh obektov, vodokhozyaystvennykh sistem i sooruzheniy na territorii Tomskoy oblasti v 2000–2005 gg.* [The state of surface water bodies, water management systems and structures in the Tomsk region in 2000–2005]. Tomsk, OJSC Tomskgeomonitoring, AGRAP-PRESS, 2006. 88 p.
38. Guseva N.V. *Mekhanizmy formirovaniya khimicheskogo sostava prirodnykh vod v razlichnykh landshafno-klimaticheskikh zonakh gorno-skladchatykh oblastey tsentralnoy Evrazii.* Avtoreferat Diss. Dokt. nauk [The mechanisms of formation of the chemical composition of natural waters in various landscape and climatic zones of mountain-folded areas of central Eurasia. Dr. Diss. Abstract]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2018. 43 p.
39. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezul'tatam mnogotselovogo geokhicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to production and results of multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000]. Ed. by E.K. Bkurenkov. Moscow, IMGRE Publ., 2002. 92 p.
40. Savichev O., Soldatova E., Rudmin M., Mazurov A. Geochemical barriers in oligotrophic peat bog (Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 113, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2019.104519.
41. SP 33-101-2003. *Opredelenie osnovnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Rulebook 33-101-2003. Definition of the main hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy Rossii Publ., 2004. 72 p.
42. GOST 19179-73. *Gidrologiya sushi. Terminy i opredeleniya* [Hydrology of sush. Terms and Definitions]. Moscow, Gosstandart of the USSR Publ., 1988. 47 p.
43. *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik pri otsutstvii dannykh gidrometricheskikh nablyudeny* [Methodological recommendations for determining the estimated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations]. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2009. 193 p.
44. Moiseyeva Yu.A. *Izmeneniya podzemnogo stoka tayezhnoy zony Zapadnoy Sibiri v golotsene.* Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Changes in the underground runoff of the taiga zone of Western Siberia in the Holocene. Can. Diss. Abstract]. Tomsk, 2018. 22 p.
45. Savichev O.G., Lgotin V.A., Moiseyeva Yu.A. Conditions for changing groundwater levels of the upper hydrodynamic zone in the Tomsk region. *Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2018, no. 6, pp. 31–40. DOI: 10.1134/S0869780318060054. In Rus.
46. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage. Water Resources, Development and Management Service FAO*, 1998, no. 56, pp. 1–276.
47. Nguyen Van Luyen, Savichev O.G., Domarenko V.A., Quach Duc Tin. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, no. 39 (2), pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.
48. SP 32.13330.2012. *Kanalizatsiya. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.04.03-85* [Sewage. Pipe-

- lines and wastewater treatment plants. Updated version of SNiP 2.04.03-85]. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia Publ., 2011. 84 p.
49. Levy J., Chesters G. Simulation of atrazine and metabolite transport and fate in a sandy-till aquifer. *Journal of contaminant hydrology*, 1995, no. 20, pp. 67–88.
  50. Savichev O.G. Investigation of the relationship between the chemical composition of water and bottom sediments of Siberian rivers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 178–188. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/5/280.
  51. Kamneva O.A. *Mnogoletnie izmeneniya gidrogeologicheskikh usloviy Sredneobskogo basseyna*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Long-term changes in the hydrogeological conditions of the Central Ob basin. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. 20 p.
  52. RD 52.24.622-2017. *Poryadok provedeniya rascheta uslovykh fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'ektov dlya ustanovleniya normativov sbrosov stochnykh vod* [Procedure for calculating the background concentrations of chemicals in the water of water bodies in order to establish standards for wastewater discharges]. Moscow, Rostov-on-Don, Rosgidromet, FGBU «SCHI» Publ., 2017. 96 p.
  53. Libera A., De Barros F.P.J., Faybishenko B., Eddy-Dilek C., Denham M., Lipnikov K., Moulton D., Maco B., Wainwright H. Climate change impact on residual contaminants under sustainable remediation. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2019, vol. 226, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2019.103518.
  54. Berezin A.E., Bazanov V.A., Mineeva T.A., Berezina L.A. The effect of highly mineralized waters on the soil and vegetation cover in oil production areas. *Tomsk State University Bulletin*, 2008, no. 306, pp. 142–148. In Rus.
  55. Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, mobility, and bioaccumulation of trace elements: abiotic processes in the rhizosphere. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. Ed. by M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. New York, USA, Taylor & Francis Group, 2006. pp. 97–110.
  56. Domarenko V.A., Savichev O.G., Ulayeva S.S. Geochemical balance of the catchment of the small Ilbokich river (Angara basin, Central Siberia). *Exploration and protection of mineral resources*, 2019, no. 7, pp. 35–42. In Rus.
  57. GOST 17.1.1.01-77. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Ispolzovaniye i okhrana vod. Osnovnye terminy i opredeleniya*. [Nature protection. Hydrosphere. Utilization of water and water protection. Basic terms and definitions]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov Publ., 2001. 30 p.
  58. GOST 25150-82. *Kanalizatsiya. Terminy i opredeleniya*. [Sewerage. Terms and Definitions. Sewerage. Terms and definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1994. 13 p.
  59. Akhmed-Ogly K.V., Savichev O.G., Tokarenko O.G., Pasechnik E.Yu., Reshetko M.V., Nalivajko N.G., Vlasova M.V. Parameter calculation technique for the waste treatment facilities using naturally-aerated blocks in the bog ecosystems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, vol. 21, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012021.
  60. Prodous O.A., Mikhaylov A.V. The experience of using peat filtration technology for surface wastewater treatment. *Water supply and sanitary equipment*, 2019, no. 3, pp. 34–39. In Rus.
  61. Corzo A., Sanabria O. Adaptation of vegetation in high-rate constructed wetland using artificial carriers for bacterial growth: assessment using phytopathological indicators. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, no. 32, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.100974.
  62. *Vodnyy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Water code of the Russian Federation]. Dated 03.06.2004, no. 74-FZ. At 08/03/2018. Moscow, Kremlin, 2018. 48 p.
  63. Zhukov A.I., Mongayt I.L., Rodziller I.D. *Metody ochistki proizvodstvennykh stochnykh vod* [Wastewater treatment methods]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1977. 204 p.
  64. Sosnovskiy A.V. The use of natural cold for cleaning and desalination of salt water. *Plumbing, heating, air conditioning*, 2018, no. 6 (198), pp. 38–41. In Rus.
  65. Randall D.G., Nathoo J. Resource recovery by freezing: a thermodynamic comparison between a reverse osmosis brine, sea water and stored urine. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, vol. 26, pp. 242–249. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.10.020.
  66. Polyakova O.S., Semyonov S.Yu. Reconstruction experience of the wastewater treatment plant (Kargasok village, Tomsk region, Russia) using «constructed wetlands» technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 400, pp. 1–4. DOI: 10.1088/1755-1315/400/1/012020.
  67. Kofman V.Ya. Modern methods of nitrogen removal from wastewater (review). *Water supply and sanitary equipment*, 2019, no. 5, pp. 44–52. In Rus.
  68. Kuznetsova I.V., Timofeeva S.S. Green technologies in land reclamation for coal mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, no. 408, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012075.
  69. Berezin A.E., Parshina N.V. Shchadyashchie metody rekultivatsii zemel na zabolochennykh territoriyakh [Mild land reclamation methods in wetlands]. *Pochvy v biosfere. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Soils in the biosphere. Materials of the All-Russian Scientific Conference]. Ed. by A.I. Syso. Novosibirsk, Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS Publ., 2018. pp. 303–307.
  70. *Rossiyskaya Federatsiya. Zakony. Ob okhrane okruzhayushchey sredy: feder. zakon ot 10.01.2002 № 7-FZ, s izmeneniyami na 29.07.2017* [Russian Federation. The laws. On Environmental Protection: Feder. Law of January 10, 2002 No. 7-FZ. (as amended on 07/29/2017)]. Moscow, Kremlin, 2018. 77 p.
  71. GOST 17.5.1.01-83. *Okhrana prirody. Rekultivatsiya zemel. Terminy i opredeleniya* [Protection of nature. Land reclamation. Terms and definitions]. Date of introduction 1984-07-01. Moscow, IPK Publ. House of Standards, 2002. 8 p.
  72. Savichev O.G., Mazurov A.K., Guseva N.V., Domarenko V.A., Khvashchevskaya A.A. Forecast of changes in the macrocomponent composition of wetland waters during iron ore mining in the Tomsk Region. *Geography and Natural Resources*, 2016, no. 1, pp. 94–102. In Rus.
  73. Bleuten W., Lapshina E., Ivens W., Shinkarenko V., Wiersma E. Ecosystem recovery and natural degradation of spilled crude oil in peat bog ecosystems of West Siberia. *International Peat Journal*, 1999, no. 9, pp. 73–82.
  74. Bazanov V.A., Savichev O.G., Volostnov D.V., Egorov B.A., Krutovoy A.O., Yazikov E.G. Effect of sludge pits on the geochemical state of wetland ecosystems in the Vasyugan River Basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 2, pp. 72–75.
  75. Ivanov K.E. *Vodoobmen v bolotnykh landschaftakh* [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p.
  76. Savichev O.G., Mazurov A.K., Semiletov I.P., Bazanov V.A., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Nalivayko N.G. Hydrogeochemical conditions of formation of oligotrophic bog ecosystems. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2016, no. 5, pp. 60–69. In Rus. Available at: <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-60-69> (accessed 23 August 2019).
  77. Bradshaw R.H.M., Sykes M.T. *Ecosystem Dynamics. From the past to the future*. Chichester, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 321 p.

Received: 17 February 2020.

#### Information about the authors

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Natalya V. Guseva, Dr. Sc., professor, head of the department, National Research Tomsk Polytechnic University.