

УДК 556.556

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ЗОН ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОХРАНИЛИЩ*

© 2016 г. **Е.В. Веницианов, Н.В. Кирпичникова, Н.М. Щеголькова**
ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук»,
Москва, Россия

Ключевые слова: Учинское водохранилище, донные отложения, тяжелые металлы, модель распространения загрязняющих веществ, критерии изменчивости параметров качества воды, зонирование водохранилищ, вторичное загрязнение, базы гидрологических, морфометрических и гидрохимических данных.

В 2011–2013 гг. на акватории Учинского водохранилища проведены комплексные экспериментальные работы в разные гидрологические сезоны. В результате исследований разработана гидродинамическая



Е.В. Веницианов Н.В. Кирпичникова Н.М. Щеголькова

модель Учинского водохранилища на основе лицензированного программного пакета SMS v.10.1 (Surface-water Modeling System) компании AQUAVEO LLC в двухмерном приближении.

Выделены основные факторы, влияющие на вторичное загрязнение от донных отложений, распространение поступивших из донных отложений загрязняющих веществ, а также возможность управления качеством воды в водохранилищах. Выработаны количественные гидрофизические, гидродинамические и гидрохимические критерии для прогноза вероятности вторичных загрязнений от донных отложений в водохранилищах. Разработана концепция зонирования водохранилищ по уровню опасности вторичного загрязнения водной массы тяжелыми металлами в период формирования условий, благоприятствующих выходу металлов из донных отложений. Проведено картирование на основе этих критериев акватории Учинского водохранилища с использованием математической модели. Предложены мероприятия по снижению вероятности вторичных загрязнений водохранилища.

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда в рамках проекта «Новые факторы загрязнения водных объектов и меры по снижению его негативного воздействия на качество вод» № 14-17-00672

Донные отложения являются неотъемлемой и динамичной частью водных объектов. Они играют важную роль в гидрологическом, геоморфологическом и экологическом функционировании речных бассейнов, включающих озера, водохранилища, эстуарии и прибрежные зоны. Скорость и характер поступления осадков и наносов зависят от природных и антропогенных факторов. Донные осадки также аккумулируют загрязняющие вещества в различных формах. Существуют значительные пространственные различия в образовании осадков, их подвижности и транспортировке. Именно эти различия регулируют интенсивность потоков поступления загрязняющих веществ (ЗВ) в водохранилище от донных осадков.

Процессы осаждения происходят в зонах, которые в водохранилищах зависят, прежде всего, от гидродинамических условий, поэтому отложения не могут рассматриваться как горизонтально однородные. Из металлов наиболее важными являются железо и марганец, которые во многих водохранилищах представляют основную часть содержания всех тяжелых металлов. Важное значение имеют их химические свойства, влияющие на высокую мобильность при изменении физико-химических условий в придонных слоях.

Природные осадки не стерильны и населены широким спектром микроорганизмов и высших форм жизни. Как следствие, эти организмы участвуют во многих химических процессах, взаимодействии между отложениями и водной фазой и изменении качества осадка. Поверхность раздела между массой воды и осадком является очень активной зоной физико-химических и биологических процессов. Важная особенность микроорганизмов – способность развиваться на значительных глубинах осадка, а также формировать структуры – биопленки [1]. Биопленки участвуют в процессах накопления и биохимической трансформации поступающих в водохранилище загрязняющих веществ. Внешняя среда и внутренний метаболизм живых бактерий оказывают сильное влияние на химизм металлов, включая изменение степени окисления, образование металлорганических соединений, осадков.

Превращение форм тяжелых металлов во многом определяют гидродинамические условия, в частности – интенсивность водообмена по глубине. От него зависит доступ кислорода и, в конечном счете, аккумуляция металлов донными отложениями. Микроэлементы в аэробных условиях активно сорбируются гидроксидами Fe и Mn, присутствующими в аморфном состоянии. При изменении физико-химических параметров (при анаэробных условиях) происходит растворение гидроксидов и металлы переходят в раствор, что может способствовать вторичному загрязнению водной среды.

Таким образом, система формирования качества воды в придонном слое чрезвычайно сложна и состоит из твердой, жидкой, газообразной и

биологической составляющих. Для формирования рекомендаций по улучшению качества воды в водохранилищах нужны параметры, позволяющие оценить состояние этой системы. Цель данного исследования – разработка интегральных показателей, позволяющих выделить участки водохранилищ, наиболее подверженные рискам вторичного загрязнения и участки, способствующие перемещению загрязненных масс.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведены полевые исследования по изучению влияния физико-химических и гидродинамических условий на загрязнение воды водохранилищ металлами. Комплексные экспериментальные работы проводились на акватории Учинского водохранилища в 2011–2013 гг. в разные гидрологические сезоны. Этот водоем входит в Волжскую систему водоснабжения Москвы и является, наряду с Клязьминским водохранилищем, замыкающим в каскаде водохранилищ водораздельного бьефа. Водный режим Учинского водохранилища практически полностью определяется перекачкой по каналу волжской воды из Иваньковского водохранилища и интенсивностью ее потребления для водоснабжения Москвы, судоходства и обводнения рек. Основные морфометрические параметры водоема представлены в табл. 1.

Таблица 1. Морфометрические характеристики Учинского водохранилища

Площадь водного зеркала, км ²	Максимальный объем, млн м ³	Полезный объем, млн м ³	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м
19,3	146	30	21,5	7,5

Проведены метеорологические, гидрологические и гидрохимические исследования. Основная цель гидрологических измерений – создание электронной карты глубин (батиметрия), течений в послойном представлении через 1,5 м, определение времени добегаания водных масс при различных режимах работы гидротехнических сооружений.

Определяли следующие параметры: глубина с помощью эхолота LCX-15mt (фирма LOWRANCE); скорость течения с помощью измерителя течений «The SonTek/YSI Argonaut»; скорость ветра с помощью ручного анемометра; координатная привязка с помощью GPSmap.

Основной целью гидрохимических измерений стало выявление сезонной динамики характеристик качества воды, исследование процессов в системе «вода – донные отложения». Задачи исследований донных отложений – изучение распределения элементов и их форм по акватории и глубине водохранилищ; определение основных факторов поступления рассматривае-

мого спектра элементов и определяющих фаз водного режима; разработка методов определения зон с повышенным содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях.

В полевых условиях определяли следующие параметры: удельную электропроводность воды кондуктометром WTW Cond 330i; содержание растворенного кислорода и температуру с помощью кислородомера WTW Oxi 330i. Определение содержания неорганических химических элементов в пробах воды и донных отложениях выполняли стандартными методами в аналитическом центре Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья им. Н.М. Федоровского (АЦИС ВИМС). В донных отложениях определялось содержание металлов: валовое и подвижные формы – в ацетатно-аммонийном буфере (pH=4,8). Подвижность = (содержание элемента в вытяжке) / (содержание элемента валовое). Методы анализа – масс-спектральный с индуктивно-связанной плазмой (MS ICP); атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой (AES ICP).

Отбор проб воды производили с помощью гидрологического батометра, донных отложений – пробоотборником «Трубка ГОИН», глубина фиксировалась эхолотом, координатная привязка – с помощью GPSmap. Сетка измерения скоростей течений состояла из 68 станций, отбора проб воды – из 65 точек, отбора проб донных отложений на определение зольности – 47 точек. Для отбора проб донных отложений на определение тяжелых металлов водохранилище было разделено на пять характерных сегментов с учетом морфометрии и гидродинамики. В каждом из пяти сегментов дважды за сезон была отобрана смешанная проба донных отложений, состоящая из пяти образцов донных отложений из случайно выбранных пунктов отбора, которые равномерно распределялись по каждому сегменту.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

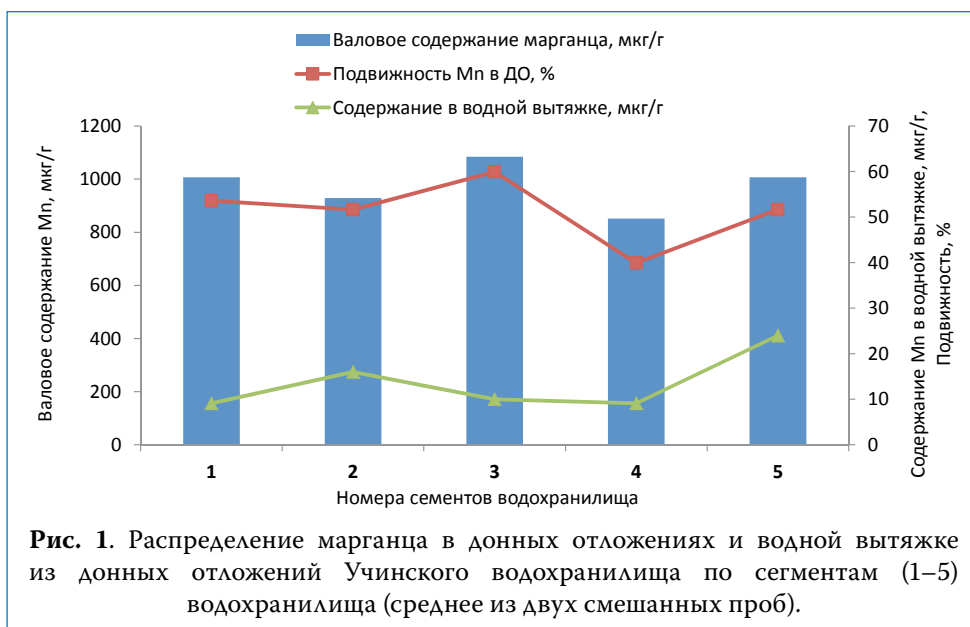
Разработана концепция зонирования водохранилищ по уровню опасности вторичного загрязнения водной массы тяжелыми металлами в период формирования условий, благоприятствующих выходу металлов из донных отложений.

Оценка опасности вторичного загрязнения от донных отложений

Опасность вторичного загрязнения обусловлена повышением активности микробиологических процессов в донных отложениях. Активность бактериоценозов донных отложений зависит от температуры и содержания органического вещества. Косвенным показателем повышения активности бактериальных сообществ является кислородный режим по вертикальному профилю в водохранилище. Если содержание кислорода снижается в придонном слое – это показатель протекающих микробиологических про-

цессов окисления органического вещества. Поэтому градиент содержания растворенного кислорода по вертикальному профилю – количественный показатель интенсивности протекающих микробиологических процессов.

Если при этом значения обозначенного градиента по растворенному кислороду коррелируют с подвижностью тяжелых металлов в донных отложениях, можно утверждать, что причиной вторичного загрязнения служат микробиологические процессы. Наиболее «мобильным» элементом в донных отложениях является марганец, что подтверждается ранее проведенными многочисленными исследованиями. Анализ подвижности марганца в донных отложениях позволил оценить зоны с наивысшим риском вторичного загрязнения (рис. 1). Водохранилище было разделено на пять характерных сегментов с учетом морфометрии и гидродинамики. Наивысшей подвижностью по марганцу (60 %) обладают пробы в сегменте 3. Этот сегмент совпадает с зонами, имеющими максимальный градиент по растворенному кислороду. Результаты анализа свидетельствуют также, что зона 3 в водохранилище характеризуется максимальным валовым содержанием марганца и самыми загрязненными придонными водами.



Далее была проведена проверка наличия связи между подвижностью металлов в донных отложениях, содержанием органических веществ в донных отложениях и кислородным режимом. Ранее авторами отмечена следующая особенность для р. Москвы, которая является зарегулированной

рекой с малой проточностью на значительной части русла: при содержании органического вещества в донных отложениях менее 7 % происходит накопление металлов, более 7 % – вымывание тяжелых металлов из донных отложений [2]. Выполнена также проверка зависимости вторичного загрязнения от глубины, т. к. в многочисленных литературных источниках утверждается, что именно с глубиной увеличивается вероятность появления в придонном слое бескислородной зоны. Показано, что связь между выделенными факторами существует, выделены зоны, где наиболее вероятно вторичное загрязнение, разработана методология картирования водохранилищ для принятия решений по проведению мелиоративных мероприятий.

Этапы оценки показателей следующие:

1. Зонирование водохранилища по глубинам: менее 1,5 м; 1,5–7,0 м; более 7 м. Эти показатели выбраны для оценки площади возможной фитомелиорации и оценки стратификации по кислороду: 1,5 м – критическая глубина, ниже которой не распространяются прибрежные макрофиты; 7 м – глубина, ниже которой (по литературным данным) в водохранилище формируется слой с недостатком кислорода в придонном слое.

2. Оценка вертикального градиента содержания кислорода, выраженного по разнице между содержанием кислорода в придонном и поверхностном слоях в отношении к содержанию кислорода в поверхностном слое (%) – кислородного градиента.

3. Оценка вертикального градиента удельной электропроводности, выраженного по разнице между удельной электропроводностью в придонном и поверхностном слоях в отношении к электропроводности в поверхностном слое (%). Формирование градиента удельной электропроводности обуславливает различие между составом воды в нижнем и верхнем слоях. Этот показатель косвенно является оценкой перемешивания масс воды (внутреннего водообмена): градиент, близкий к нулю, свидетельствует о перемешивании слоев. В результате по данному показателю выделяются потенциально «транзитные» зоны загрязняющих веществ.

4. Оценка содержания органического вещества в донных отложениях (менее 7 %, более 7 %) [2].

5. Выделение зон пересечения наиболее опасных факторов вторичного загрязнения: максимальное содержание органических веществ в донных отложениях; максимальная глубина; максимальный по модулю кислородный градиент и транзитные зоны с максимальной скоростью перемещения загрязняющих веществ в водной толще (максимальные скорости течения, нулевой вертикальный градиент по удельной электропроводности).

На основе этих показателей разработан алгоритм анализа картографического материала для выявления наиболее опасных по вторичному загрязне-

нию зон (их расположение и площадные оценки), а также зон, нуждающихся в мелиоративных мероприятиях. На рис. 2 представлено зонирование водохранилища по глубинам и содержанию органического вещества, на рис. 3 – зонирование по глубинам и кислородному градиенту, на рис. 5 – пересечение всех трех наиболее опасных зон (а, б, в). В табл. 2 представлена количественная оценка зависимости кислородного градиента от глубины: площади зон с разными глубинами (<1,5 м; 1,5–7,0 м; >7 м) и разным кислородным градиентом выражены в процентах от общей площади водохранилища.

Таблица 2. Площади зон с разными глубинами (<1,5 м; 1,5–7,0 м; >7 м) и разным кислородным градиентом, % от общей площади водохранилища.

Зоны с глубинами	Зоны с градиентом по содержанию кислорода между поверхностным и придонным слоями, %						
	менее –100	от –100 до –80	от –80 до –60	от –60 до –40	от –40 до –20	0	0–20
Менее 1,5 м	0	0	0	2	2	1	0
От 1,5 до 7,0 м	0	1	2	13	22	6	0
Более 7 м	0	2	5	31	11	2	0

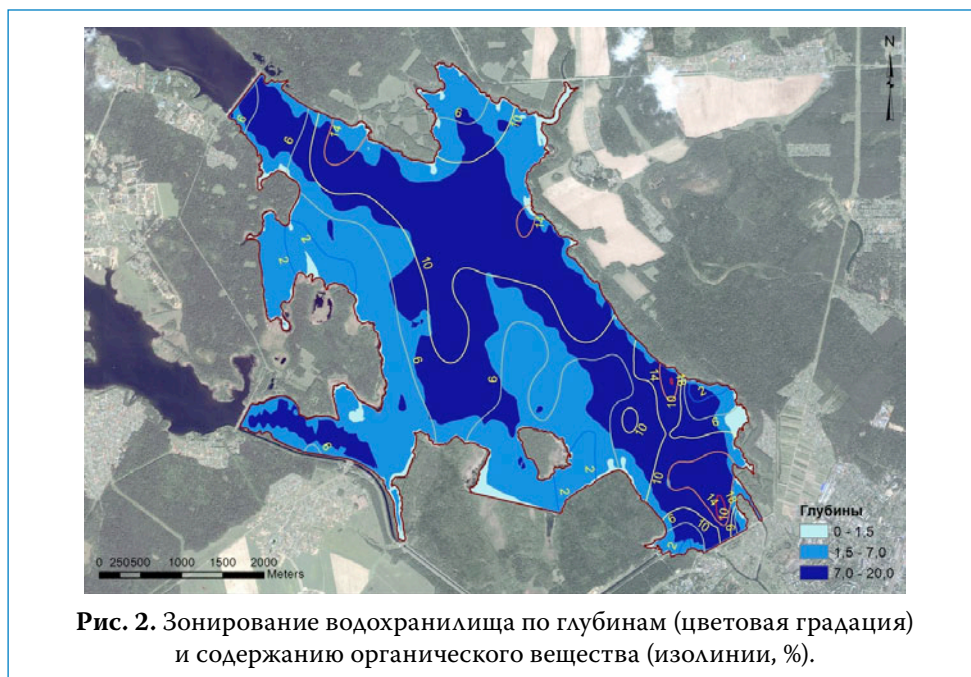


Рис. 2. Зонирование водохранилища по глубинам (цветовая градация) и содержанию органического вещества (изолинии, %).

На рис. 2 видно, что большая часть зон с максимальным содержанием органических веществ в донных отложениях приурочена к зонам максимальной глубины, что обусловлено процессами седиментации, протекающими наиболее активно именно в зонах с максимальными глубинами, где снижается скорость течения воды. Однако зона максимального градиента по растворенному кислороду не полностью соответствует зоне максимальной глубины (рис. 3). Из приведенных данных табл. 2 следует, что в Учинском водохранилище площадь зоны с наибольшей вероятностью выхода загрязнений из донных отложений (которые являются пересечением зон с кислородным градиентом более 40 % (по модулю) и зон с глубинами более 7 м), составляет около 38 % от общей площади водохранилища. Эти данные следует использовать при оценке технико-экономических показателей мелиорационных мероприятий, т. к. именно зоны с максимальным содержанием органических веществ и максимальным кислородным градиентом нуждаются в очистке дна от илистых донных отложений, загрязняющих толщу воды.

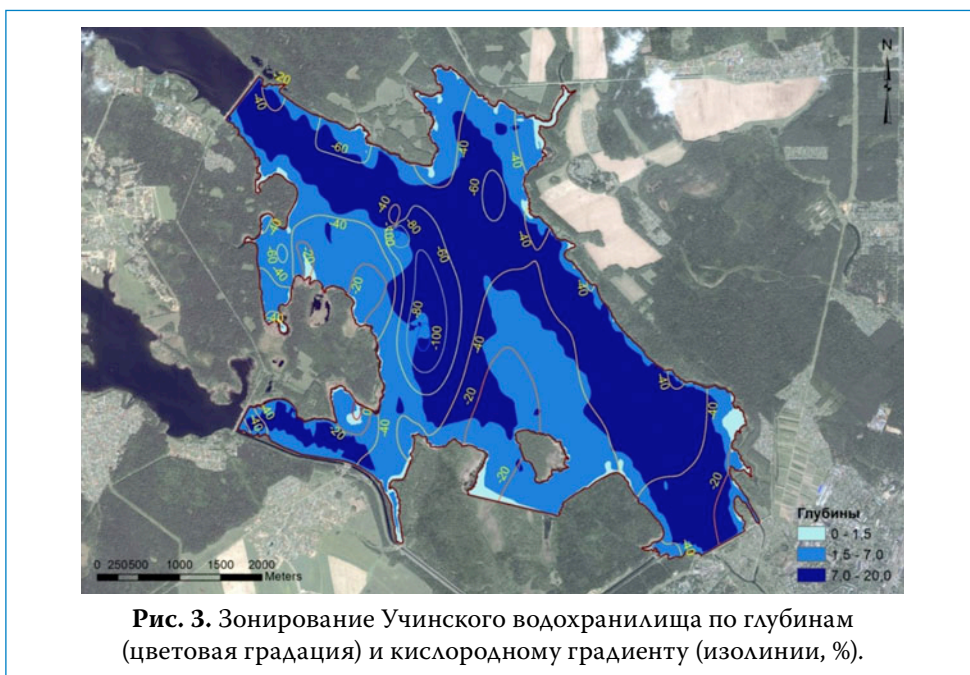


Рис. 3. Зонирование Учинского водохранилища по глубинам (цветовая градация) и кислородному градиенту (изолинии, %).

Оценка риска перемещения загрязняющих веществ от донных отложений в сторону водозабора

Гидродинамическая модель Учинского водохранилища разработана на основе лицензированного программного пакета SMS v.10.1 (Surface-water Modeling System) компании AQUAVEO LLC в двухмерном приближении [3, 4].

Расчет основных характеристик проводился в два этапа. На первом определяли гидродинамические характеристики, в первую очередь – глубину и скорость потока [5]. На втором этапе проводился расчет полей загрязнений, которые создаются рассматриваемыми источниками загрязнения. Гидродинамическая модель позволила выделить зоны с разным диапазоном скоростей течения.

На рис. 4 представлена оценка площади и расположения зон с максимально возможным перемещением загрязняющих веществ – по скоростям течения и градиенту удельной электропроводности. Зона с максимальными скоростями (более 0,02 м/с) и максимальным градиентом (более 5 %) составляет всего 6 % от акватории (табл. 3). Однако имеет значение взаиморасположение зон с повышенным риском вторичного загрязнения и зон наибольшей вероятности перемещения загрязняющих веществ. На рис. 5 показано, что зона наибольшей вероятности перемещения загрязняющих веществ находится между зоной с повышенным риском вторичного загрязнения и водозабором. Такое расположение подтверждает, что выполнение мелиоративных мероприятий с донными отложениями должно быть произведено незамедлительно, т. к. загрязняющие вещества напрямую попадают из донных отложений в водозабор [6].

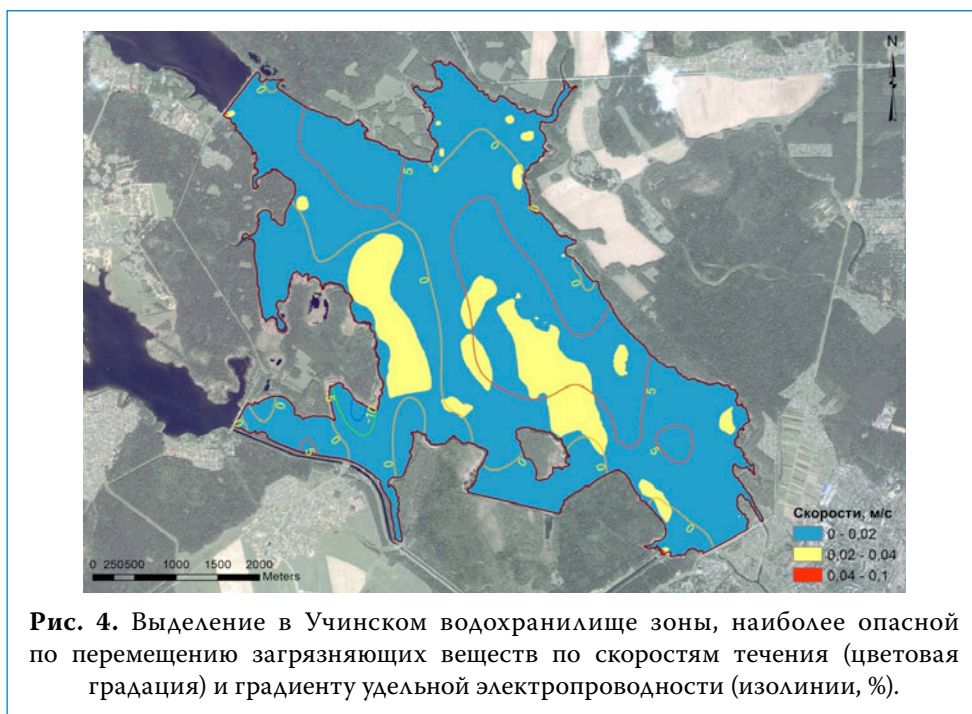


Рис. 4. Выделение в Учинском водохранилище зоны, наиболее опасной по перемещению загрязняющих веществ по скоростям течения (цветовая градация) и градиенту удельной электропроводности (изолинии, %).

Таблица 3. Площади зон с разным распределением скоростей для Учинского водохранилища ($<0,02$; $0,02-0,04$; $>0,04$ м/с) и разным градиентом удельной электропроводности между поверхностным и придонным слоями

Зоны распределения скоростей	Зоны с градиентом по удельной электропроводности между поверхностным и придонным слоями, %				
	менее (-10)	-5	0	5	10
Менее 0,02 м/с	0	1	25	41	19
От 0,02 до 0,04 м/с	0	0	6	4	4
Более 0,04 м/с	0	0	0	0	0

Разработка концепции мелиоративных мероприятий

Основой технико-экономического обоснования по фитомелиорации может служить инженерно-биологическая реконструкция площади с глубинами менее 1,5 м, равной 90 га или 5,0 % всей площади водного зеркала Учинского водохранилища (табл. 2).

Значительного повышения качества воды в водохранилищах можно достичь применением естественных биологических систем очистки на основе сообществ прибрежно-водной растительности. Фитоочистные системы (или биоплато) рекомендуется размещать по устьям наиболее загрязненных рек, впадающих в питьевое водохранилище или впадающих в реки, несущие воды в водохранилище. Прибрежно-водная растительность, выделяя при фотосинтезе кислород, оказывает благотворное влияние на кислородный режим прибрежной зоны водоема. Обитающие на поверхности растений бактерии и водоросли (перифитон) выполняют активную роль в очистке воды. В зарослях прибрежно-водных растений развивается сообщество организмов, которое принимает участие в самоочищении воды и донных отложений. Под влиянием этих процессов в воде повышается содержание растворенного кислорода, возрастает ее прозрачность и содержание биогенных веществ, снижается минерализация воды и количество промежуточных продуктов распада органического вещества.

Роль прибрежно-водных растений в самоочищении водоемов в общем виде можно свести к следующему:

- механическая очистительная функция, когда в зарослях растений задерживаются взвешенные и слаборастворимые органические вещества;
- минерализация и окислительная функция;
- детоксикация органических загрязняющих веществ.

Инженерные сооружения с фито-очисткой относятся к наиболее прогрессивным методам естественной биологической очистки сточных вод,

получившим широкое применение во многих странах мира. Существуют различные классификации систем очистки сточных вод на таких сооружениях: с точки зрения инженерного проектирования и с учетом гидравлического распределения потоков жидкости различают поверхностные, горизонтальные инфильтрационные, вертикальные инфильтрационные и системы смешанного типа. Различные типы имеют свои особенности, что и создает возможность очистки разных категорий сточных вод.

Для оценки возможности применения технологии биоплато были отобраны образцы дикого риса на Учинском водохранилище, чтобы оценить возможный вынос элементов с удаляемой биомассой. Ежегодно в рамках уже осуществляемых мелиоративных мероприятий из водохранилища удаляется (по оценочным расчетам) около 400 т сырой биомассы или около 40 т сухого вещества биомассы. Вместе с этой биомассой удаляется около 600 кг азота и около 20 кг марганца. Для сравнения: во время половодья в водохранилище поступает более 100 кг марганца в сутки.

Проведен расчет максимально возможной эффективности этого мероприятия. Учитывая площадь водохранилища, зона возможного размещения прибрежной растительности составляет около 90 га. Принимая продуктивность прибрежной растительности 1000 г с 1 м² по сухому веществу в год, получаем, что максимально возможное удаление азота с растительностью составляет 1,4 т, марганца 0,4 т. Несмотря на то, что расчетное количество веществ не столь велико, роль фито-очистки вдоль берегов может быть значительно выше. Дело в том, что только в бактериальных сообществах такого типа с выраженными многоуровневыми трофическими цепями возможно разложение и обезвреживание до безопасного уровня так называемых ксенобиотиков, а кроме того, обеззараживание условно патогенных организмов. Выполненное в ходе исследования зонирование водохранилищ является основой для развития технологии по разложению ксенобиотиков и обеззараживанию воды в питьевых водохранилищах.

Очистку донных отложений водохранилищ в зонах, выделенных как наиболее опасные по вторичному загрязнению, целесообразно проводить плавучими землесосными снарядами. Расположение зоны донных отложений, нуждающейся в скорейшей мелиорации, представлено на рис. 5. Известны приемы консервации донных отложений за счет их изоляции от основной толщи воды, но все эти мероприятия не имеют широкого распространения.

Таким образом, выделены основные факторы, влияющие на:

1) вторичное загрязнение от донных отложений:

– композиционный состав донных отложений, в т. ч. содержание органического вещества;

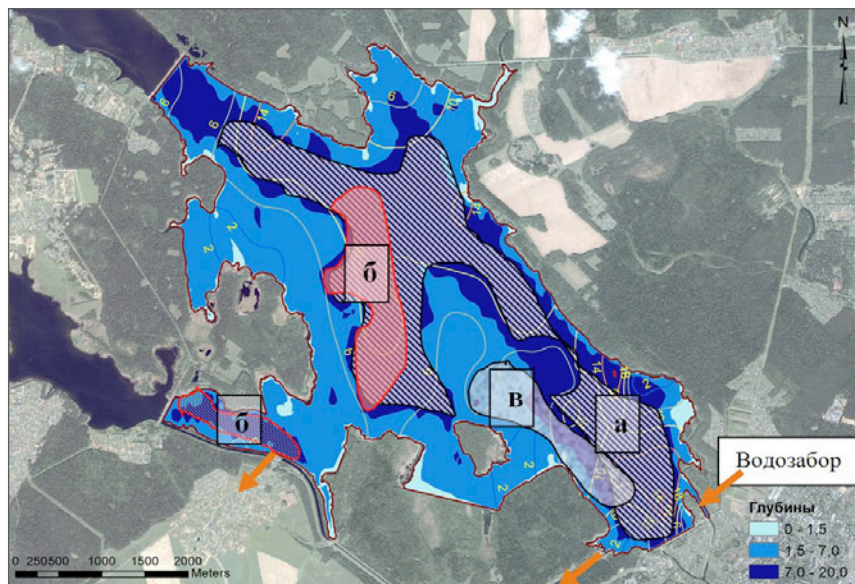


Рис. 5. Размещение в Учинском водохранилище зон с высоким риском загрязнения от донных отложений: а – максимальное содержание органических веществ и максимальная глубина; б – максимальный по модулю кислородный градиент и максимальная глубина; в – зона высокого риска переноса загрязняющих веществ (максимальные скорости и нулевой градиент удельной электропроводности).

– наличие вертикального градиента окислительно-восстановительных условий, влияющего на переход марганца из донных отложений в воду;

2) распространение поступивших из донных отложений загрязняющих веществ по водохранилищу:

– наличие горизонтального градиента скоростей течения;

– наличие перемешивания воды, определяемое по нулевому вертикальному градиенту удельной электропроводности;

3) возможность управления качеством воды в водохранилищах:

– наличие зарослей высшей водной растительности;

– глубина залежей ила и содержание органического вещества в донных отложениях;

– «пересечение» зон вторичного загрязнения с зонами «распространения» загрязняющих веществ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенной работы предложены новые критерии для оценки риска вторичных загрязнений водохранилищ от донных отложений. Сформулированы две группы критериев:

- критерии, характеризующие зоны, с повышенной вероятностью вторичных загрязняющих веществ из донных отложений;
- критерии, характеризующие транзитные зоны, в которых происходит активное перемещение загрязняющих веществ в направлении течения.

При вычислении критериев используются данные морфологии дна водохранилища, гидрохимических характеристик водной массы, содержания органических веществ в донных осадках, валового содержания и форм разной подвижности тяжелых металлов.

Разработан алгоритм анализа картографического материала для водохранилищ с целью выявления зон повышенного риска вторичных загрязнений из донных отложений, а также зон с активным переносом загрязнений за счет течений, основанный на наложении зон с повышенными значениями критериев. Зоны повышенного риска вторичных загрязнений представляют объекты применения мелиоративных мероприятий.

Необходимым компонентом предложенной системы критериев является использование баз гидрологических, морфометрических и гидрохимических данных. Для снижения затрат на получение натуральных данных рекомендуется использование двухмерной гидродинамической модели водохранилища, для параметризации которой используются натурные данные.

Разработанная методология была применена на Учинском водохранилище и позволила выделить расположение следующих зон: с максимальным риском вторичного загрязнения; с максимальным транзитом загрязняющих веществ в сторону водозабора; зону размещения фитоочистных сооружений; зону, нуждающуюся в скорейшей мелиорации донных отложений (очистка, консервация). Наиболее существенным развитием предложенной методологии является проведение активного натурального эксперимента для двух сезонов: весеннего паводка, когда отмечается повышенная транзитная способность водохранилища, и летней межени в период формирования четко выраженного термоклина, способствующего изменению физико-химических условий в придонном слое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Förstner U., Bernhard W.* Sediment Dynamics and Pollutant Mobility in Rivers. Publisher Berlin, New York: Springer, 2007. 430 p.
2. *Щеголькова Н.М., Веницианов Е.В.* Охрана загрязненной реки: интенсификация самоочищения и оптимизация водоотведения. М.: РАСХН, 2011. 388 с.

3. Веницианов Е.В., Лепихин А.П., Кирпичникова Н.В. Экспериментальные исследования и математическое моделирование гидродинамической структуры формирования загрязнений в водохранилищах (на примере Учинского и Клязьминского водохранилищ) // Сб. докл. всерос. науч. конф. «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз». Краснодар. 2013. С. 280–285.
4. Donnell B.P., Letter J.V., McAnally W.H., Thomas W.A. Users Guide for RMA2 Version 4.5. 2009. Режим доступа: <http://chl.wes.army.mil/software/tabs/docs.htm>
5. Веницианов Е.В., Лепихин А.П., Кирпичникова Н.В. Разработка гидродинамической модели и модели распространения загрязнений равнинного водохранилища (на примере Клязьминского водохранилища) // Водное хозяйство России. 2013. № 2. С. 96–107.
6. Веницианов Е.В., Щеголькова Н.М., Кирпичникова Н.В., Полянин В.О. Разработка технологических критериев для регулирования экологического состояния водохранилищ – источников питьевого водоснабжения. Режим доступа: / http://www.ecos-samara.ru/images/stories/news/viv_draftprogramme.pdf

Сведения об авторах:

Веницианов Евгений Викторович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий лабораторией охраны вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (ИВП РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: eugeny.venitsianov@gmail.com

Кирпичникова Наталья Владимировна, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория охраны вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (ИВП РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: nkirp@list.ru

Щеголькова Наталья Михайловна, д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория охраны вод, ФГБУН «Институт водных проблем Российской академии наук» (ИВП РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: nshegolkova@mail.ru