

К ВОПРОСУ ОБ АПРОБАЦИИ  
«ПОСОБИЯ ПО ВЫБОРУ ПРИОРИТЕТНЫХ  
ДЕЙСТВИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА  
ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ РЕАБИЛИТАЦИЮ ВОДОЕМОВ»  
СООБЩЕНИЕ 1. ВЫБОР МЕТОДОВ РЕАБИЛИТАЦИИ  
МАЛОПРОТОЧНЫХ ВОДОЕМОВ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ИРТЯШ)

© 2018 г. А.Н. Попов, Т.Е. Павлюк, В.Ф. Мухутдинов,  
Е.В. Загайнова, А.С. Польшгалов, В.В. Сандалова,  
О.А. Милицына, Е.А. Бутакова

*ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург, Россия*

**Ключевые слова:** экологическая реабилитация, эвтрофирование, гидрохимическая характеристика, гидробиологическое состояние, биогенная нагрузка, трофическое состояние, антропогенное загрязнение, качество воды, оз. Иртыш.

Представлены результаты прикладного исследования в рамках апробации разработанного в ФГБУ РосНИИВХ «Пособия по выбору приоритетных действий, направленных на экологическую реабилитацию водоемов».

Объектом исследования является оз. Иртыш, Каслинского района, Челябинской области. В последние годы качество воды оз. Иртыш ухудшилось, периодически стали возникать чрезвычайные ситуации, связанные с массовым развитием синезеленых водорослей. При массовом развитии и отмирании синезеленых водорослей появляются метаболические токсины, снижающие потребительские качества воды.

Изучено формирование гидрохимического режима водоема с учетом всех воздействующих факторов, проведена оценка факторов, влияющих на процесс формирования гидробиологического и гидрохимического режима оз. Иртыш. Определены потоки загрязняющих и биогенных веществ. Дана оценка трофического статуса водоема по гидробиологическим показателям. Выявлены источники антропогенного загрязнения территории озера.

Антропогенное воздействие на озера может вызывать либо эвтрофикационные процессы, либо ухудшение состояния за счет техногенного воздействия, либо иметь последствием оба процесса – эвтрофикацию и ухудшение гидрохимического и гидробиологического состояния водоема. Эвтрофикацию могут вызывать и природные процессы (например, естественное старение озер).

В работе [1] изложено основное содержание разработанного ФГБУ РосНИИВХ «Пособия по выбору приоритетных действий, направленных на реабилитацию непроточных и малопроточных озер» (далее «Пособие...»), позволяющего определить оптимальный набор мероприятий, направленных на экологическую реабилитацию водоемов. Исходная информация опирается на натурные и расчетные данные для конкретного водного объекта, расчеты основных потоков загрязняющих и биогенных веществ, определение трофического состояния водоема с экосистемных позиций, ранжирование потоков веществ по значимости влияния, выбор оптимального набора методов по эффективной реабилитации водного объекта. Применение основных положений «Пособия...» возможно при условии, что лимитирующим элементом этих процессов является фосфор общий, т. е. соотношение концентраций азота валового к фосфору валовому должно быть не менее семи.

### ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При выборе изложенном в «Пособии...» метода реабилитации водоемов определен порядок необходимых мероприятий:

1. Проводится батиметрическая съемка водоема с определением глубин воды и мощности донных отложений. Определяются средняя глубина, объем воды и донных отложений, зависимость площади и объема водоема от уровня воды, период водообмена.

2. Определяются степень зарастаемости водного объекта и средняя биомасса на единицу площади.

3. Проводится оценка гидрохимического и гидробиологического состояния водного объекта.

4. Оценивается химический состав донных отложений и уровень вторичного загрязнения от них.

5. Для эвтрофируемых водных объектов:

– определяется удельный поток фосфора (общего) в водные массы ( $\Gamma_{\text{сум}}$ , г/м<sup>2</sup>·год):

$$\Gamma_{\text{сумм}} = \Gamma_{\text{внешн}} + \Gamma_{\text{внутр}}, \quad (1)$$

где  $\Gamma_{\text{внешн}}$  – удельный поток фосфора (общего) в водные массы водоема, формируемый за счет внешних источников поступления, г/м<sup>2</sup>·год;

$\Gamma_{\text{внутр}}$  – удельный поток фосфора (общего) в водные массы водоема от внутренних источников поступления, г/м<sup>2</sup>·год.

$$\Gamma_{\text{внешн}} = \frac{\Pi_{\text{внешн}}}{F_{\text{В}}}, \quad (2)$$

где  $\Pi_{\text{внешн}}$  – поступление общего фосфора из внешних источников за вычетом выноса с истоками, г/год;

$$\Gamma_{\text{внешн}} = \Pi_{\text{рс}} + \Pi_{\text{ст}} + \Pi_{\text{атм}} + \Pi_{\text{рх}} + \Pi_{\text{ота}} + \Pi_{\text{лп}} + \Pi_{\text{тер}} + \Pi_{\text{ист}}, \quad (3)$$

где  $\Pi_{\text{рс}}$  – поступление фосфора с речным (руслowym) стоком (при прямом методе определения является интегральной характеристикой территории водосбора, при косвенном – не учитывается), г/год;

$\Pi_{\text{ст}}$  – поступление фосфора со сточными водами промышленности, ливневой и хозяйственно-бытовой канализации, сбрасываемыми непосредственно в водоем, г/год;

$\Pi_{\text{атм}}$  – поступление фосфора с атмосферными осадками, г/год;

$\Pi_{\text{рх}}$  – поступление фосфора от садкового рыбного хозяйства, г/год;

$\Pi_{\text{ота}}$  – поступление фосфора от отдыхающих на территории рекреации, г/год;

$\Pi_{\text{лп}}$  – поступление фосфора с листовым опадом, г/год;

$\Pi_{\text{тер}}$  – поступление фосфора с недренируемой водотоками территории водосбора водоема, г/год;

$\Pi_{\text{ист}}$  – вынос фосфора из водоема с водой истоков, водозабором, г/год. Для непроточных водоемов  $\Pi_{\text{ист}}$  равен нулю.

$F_{\text{в}}$  – площадь водоема при фактическом уровне воды, м<sup>2</sup>.

$$\Gamma_{\text{внутр}} = \Gamma_{\text{ав}} + \Gamma_{\text{дмо}} + \Gamma_{\text{фпл}} + \Gamma_{\text{нм}}, \quad (4)$$

где  $\Gamma_{\text{ав}}$  – удельная нагрузка фосфором от плавающей и затопленной древесины, г/м<sup>2</sup> · год;

$\Gamma_{\text{дмо}}$  – удельная нагрузка фосфором от донных отложений, обусловленная окислением стойкого мертвого органического вещества, г/м<sup>2</sup> · год;

$\Gamma_{\text{фпл}}$  – удельная нагрузка фосфором, обусловленная окислением биомассы фитопланктона, г/м<sup>2</sup> · год;

$\Gamma_{\text{нм}}$  – удельная нагрузка фосфором, обусловленная окислением биомассы макрофитов, г/м<sup>2</sup> · год.

Далее устанавливается фактический трофический статус водоема, источники поступления фосфора ранжируются по массе поступающего ингредиента, определяется необходимое для достижения задаваемого уровня трофности снижение биогенной нагрузки. На основании ранжирования устанавливается, инактивация каких источников будет соответствовать достижению поставленной цели, с учетом наилучших доступных технологий (НДТ) выбираются методы их нейтрализации. В случае недостижения необходимого снижения поступления в водоем ингредиента повторно составляется прогноз состояния водного объекта после инактивации дополнительно выбранных источников.

### Выбор объекта и обоснование необходимости его реабилитации

В настоящее время единственным источником питьевого водоснабжения г. Озерска и технического водоснабжения НПО «Маяк» является

оз. Иртяш. В 2012–2014 гг. в озере впервые с начала наблюдений (1949 г.) зафиксировано интенсивное «цветение» водорослей с появлением в воде запаха геосмина, т. е. в оз. Иртяш начали проявляться процессы, характеризующие водоем как высокоэвтрофный, что явилось совокупным результатом антропогенного воздействия и маловодных лет последнего десятилетия.

Озеро Иртяш входит в Каслинско-Кыштымскую систему озер, которая вытянута цепочкой в меридиональном направлении вдоль восточного склона Вишневых и Потаниных гор. Этот горный район является водосборной территорией для системы озер, площадь его достигает 1,8 тыс. км<sup>2</sup>.

Водоем занимает центральное положение в озерной системе, имеет два плеса: Большой – с глубиной до 12 м и Малый – с глубиной до 22 м. Берега озера пологие, низкие, песчаные, южный берег Малого плеса заболочен.

Поскольку оз. Иртяш лежит ниже расположенных вокруг озер, оно является резервуаром, собирающим воды из всех связанных между собой окружающих водоемов, болот, рек и ручьев [2]. Площадь озера и его объем непостоянны и постепенно уменьшаются. В начале XIX в. была построена плотина на р. Тече, что способствовало увеличению площади озера (уровень воды поднялся на 3 м), а также привело к слиянию с оз. Иртяш расположенных на правом берегу озер Большое и Малое Проволочное, Травакуль, Маукская Кулига и к подпруживанию озера, что способствовало относительной стабилизации его уровня.

Современная площадь озера – 53,5 км<sup>2</sup>, на карте Палласа (1770 г.) – в два раза больше. Как «центральный» водоем Иртяшско-Каслинско-Кыштымской системы оз. Иртяш подвергается опосредованному воздействию сточных вод промышленных предприятий и хозяйственно-бытовой канализации населенных пунктов, расположенных на его водосборной площади, крупнейшие из которых города Касли и Кыштым, воздействию неорганизованных ливневых стоков с территорий частной застройки, расположенной по берегам впадающих в озеро рек и каналов. На состояние озера могут отрицательно влиять неорганизованный и неучтенный забор воды из притоков в пределах населенных пунктов.

Как показали предварительные исследования, оз. Иртяш нуждается в реабилитационных мероприятиях, снижающих возможность его интенсивного эвтрофирования. По результатам обследования 2017 г., соотношение концентраций общего азота и общего фосфора составляет 7,22, что указывает на возможность использования «Пособия...» для разработки реабилитационных мероприятий, направленных на деэвтрофирование водоема.

Предварительная оценка современного трофического состояния озера выполнена по индексу развития береговой линии и по морфоэдафическому индексу.

Одним из параметров, используемым для определения склонности водоема к интенсивному эвтрофированию, является индекс развития береговой линии (SDI) [2]. Значение индекса указывает на степень неровности береговой линии водоема и определяется как отношение длины береговой линии водоема к длине окружности, площадь которой равна площади водоема.

Используя данные по площади оз. Иртяш (53,5 км<sup>2</sup> при НПУ 227,0 м) и длине береговой линии (72,8 км), получено следующее значение индекса:

$$SDI = 72,8 / (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot 53,5}) = 2,81.$$

При этом следует также учесть наличие трех крупных островов (Светляк, Моськин, Шатанов), имеющих свою береговую линию и полноценно функционирующих как наземные экосистемы – источник аллохтонного органического вещества. Подсчет береговой линии островов в сумме с внешней линией озера дал следующую величину: 72,8 км + 40,5 км = 113,3 км. Вторая величина индекса развития береговой линии равна:  $SDI = 113,3 / (2 \cdot \sqrt{\pi \cdot 53,5}) = 4,36$ .

По индексу развития береговой линии, особенно с учетом береговой линии крупных островов, оз. Иртяш имеет значительную естественную предрасположенность к эвтрофикации. Это указывает на то, что в процессе водопользования должны жестко выполняться водоохранные мероприятия на частном водосборе с полным исключением поступления каких-либо стоков.

Морфоэдафический индекс (МЭИ) позволяет рассчитать концентрацию фосфора в воде, характерную для естественных процессов в водном объекте, а также определить долю фосфора, поступающую в воду за счет всех видов антропогенной деятельности [3]. Для вычисления МЭИ используется следующая формула:

$$МЭИ = C/H, \quad (5)$$

где МЭИ – морфоэдафический индекс;

С – средняя величина электропроводности воды,  $\mu\text{S/cm}$  при 20 °С;

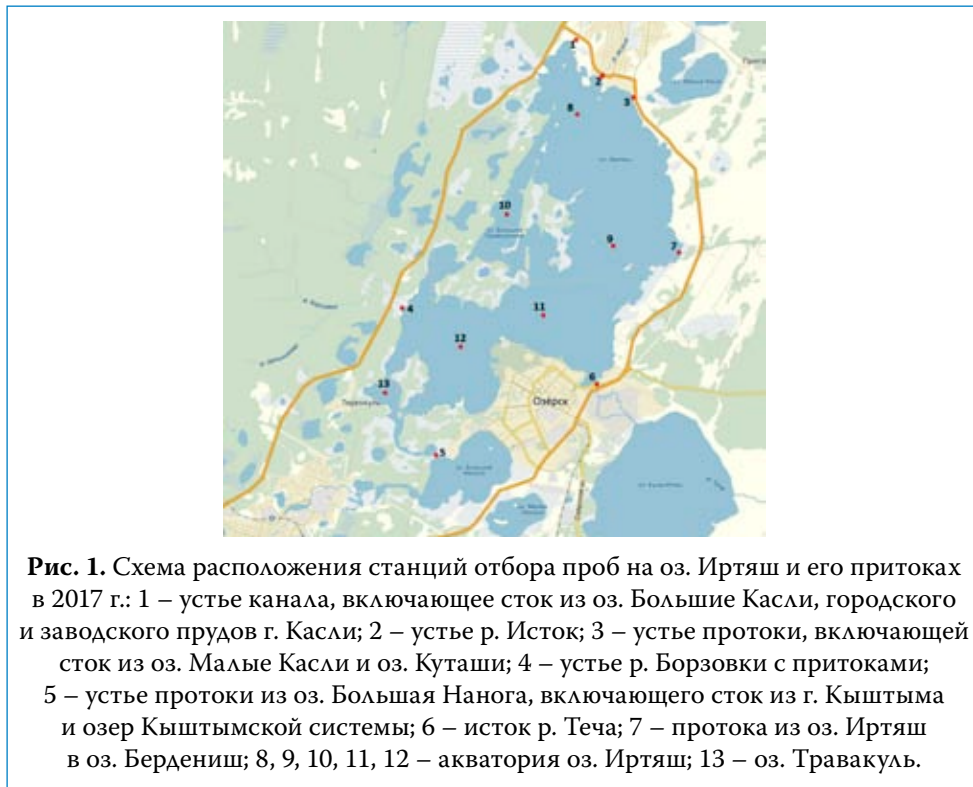
Н – средняя глубина водного объекта, м.

Концентрация общего фосфора в данном случае рассчитывается по формуле:

$$\text{Lg } |P| = 0,75 + 0,27 (\pm 0,11) \cdot \text{Lg } МЭИ. \quad (6)$$

Расчеты показывают, что с учетом стандартного отклонения, природная концентрация общего фосфора в воде оз. Иртяш должна колебаться от 10,5 мкг/л до 25,0 мкг/л. Часть фосфорной нагрузки антропогенного происхождения, учитывая реальную среднюю концентрацию в пределах 195 мкг/л за 2017 г., составляет 178,7 мкг/л (92 %). Высокая расчетная доля общего фосфора на основании морфоэдафического индекса дополнительно подтверждает большую предрасположенность оз. Иртяш к интенсивному эвтрофированию.

На рис. 1 приведена схема территории проведения исследовательских работ в 2017 г. Порядок действий при проведении исследовательских работ соответствовал изложенному в «Пособии...».



**Рис. 1.** Схема расположения станций отбора проб на оз. Иртыш и его притоках в 2017 г.: 1 – устье канала, включающее сток из оз. Большие Касли, городского и заводского прудов г. Касли; 2 – устье р. Исток; 3 – устье протоки, включающей сток из оз. Малые Касли и оз. Куташи; 4 – устье р. Борзовки с притоками; 5 – устье протоки из оз. Большая Нанюга, включающей сток из г. Кыштыма и озер Кыштымской системы; 6 – исток р. Теча; 7 – протока из оз. Иртыш в оз. Бердениш; 8, 9, 10, 11, 12 – акватория оз. Иртыш; 13 – оз. Травакуль.

### ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОЗЕРА ИРТЯШ И ЕГО ПРИТОКОВ

В перечень аналитов изначально включено 34 компонента, 10 из которых были исключены ввиду их значительно низких концентраций, содержания в отобранных пробах воды ниже пределов обнаружения соответствующих методик: запах, ионы кадмия, калия, кальция, магния, натрия, свинца, хрома общего, сульфат-ионы, хлорид-ионы. Непосредственно в полевых условиях проводили замеры растворенного в воде кислорода, температуры, удельной электропроводности и минерализации.

**Акватория оз. Иртыш.** Отбор проб воды на акватории оз. Иртыш проведен на четырех гидрохимических станциях (8, 9, 11, 12). Кислородного дефицита в озере не наблюдалось, уровень растворенного кислорода 8–13 мг/дм<sup>3</sup> на протяжении всего периода исследований.



Вода в озере слабощелочная, водородный показатель, в основном, на уровне 8,0–8,4 ед. рН. Однако в июле отмечено его резкое увеличение – величина рН в створах 11, 12 достигала 9,7–9,8 ед. рН.

Цветность воды в озере принимала минимальные значения в марте (15 град. цветности), максимальные – в мае (68 град. цветности). Концентрация солей в воде находилась на уровне 250–300 мг/дм<sup>3</sup>. Величина ХПК – в пределах от 15 (в марте) до 30 мг/л (в августе). Величина БПК<sub>5</sub> изменялась от 0,75 (март) до 2,6 мг/л (май). Содержание элементов азотной группы на протяжении всего периода наблюдений не превышало значений ПДК<sub>рх</sub>.

Основная форма общего фосфора представлена фосфат-ионами, содержание органического фосфора в водоеме очень низкое. На рис. 2 представлена диаграмма изменения концентрации фосфора общего в оз. Иртяш.

Концентрация фторид-ионов в воде озера была на уровне 0,45–0,55 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание железа общего не превышало 0,095 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация ионов марганца начинала расти с мая (0,045 мг/дм<sup>3</sup>), в августе достигала своего максимума (0,192 мг/дм<sup>3</sup>), а к осени снова снижалась. Концентрация ионов меди снижается с марта по октябрь. Максимальное содержание зафиксировано в марте – в среднем 0,046 мг/дм<sup>3</sup>, в мае этот показатель имел величину 0,02 мг/дм<sup>3</sup>, в августе 0,012 мг/дм<sup>3</sup>, в октябре (в створах 11, 12) 0,07 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация ионов цинка за весь период наблюдений составляла в среднем 0,03 мг/дм<sup>3</sup>.

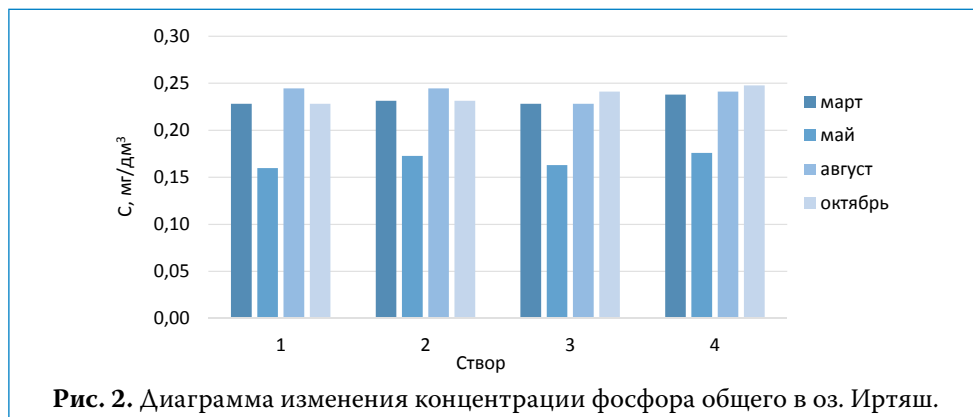


Рис. 2. Диаграмма изменения концентрации фосфора общего в оз. Иртяш.

Содержание ионов алюминия в целом находилось на уровне 0,05 мг/дм<sup>3</sup> и ниже. Также в воде озера в небольших количествах обнаружены нефтепродукты и фенолы. Содержание взвешенных веществ незначительное.

**Оз. Большое Проволочное (ст. 10).** Дефицита растворенного кислорода в озере не наблюдалось. Водородный показатель изменялся в пределах 8,10–8,58 ед. рН. Цветность в озере максимальная в августе –

89 град. цветности, минимальная – в марте 19,5. Содержание взвешенных веществ – не более 11,4 мг/дм<sup>3</sup>.

Концентрация солей в среднем равна 280 мг/дм<sup>3</sup>. Максимум содержания органических веществ отмечен в августе (БПК<sub>5</sub> 6,4 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК 49 мгО/дм<sup>3</sup>). Содержание элементов азотной группы не превышало соответствующие значения ПДК<sub>рх</sub>. Максимальная концентрация фосфора общего наблюдалась в августе (0,32 мг/дм<sup>3</sup>), минимальная – в мае (0,13 мг/дм<sup>3</sup>). Органического фосфора мало, основная часть общего фосфора была представлена минеральным.

Концентрация железа общего в озере изменялась в пределах 0,03–0,076 мг/дм<sup>3</sup>, ионов алюминия в целом незначительна. Концентрация ионов марганца на протяжении всего периода наблюдений колебалась от 0,016 мг/дм<sup>3</sup> (март) до 0,067 мг/дм<sup>3</sup> (октябрь), ионов меди снижалась с марта (0,044 мг/дм<sup>3</sup>) и в октябре была ниже предела обнаружения. Максимальная концентрация ионов цинка зафиксирована в марте (0,046 мг/дм<sup>3</sup>).

**Оз. Травакуль (ст. 13).** Пробы в данном створе были отобраны в марте, мае, августе и октябре. Уровень растворенного кислорода приходит в норму в мае (13,24 мг/дм<sup>3</sup>) и все следующие месяцы его величина остается в норме. Вода в озере имеет слабощелочную среду, рН изменяется в пределах 8,17–8,44. Цветность воды в мае увеличивается до 79 град. цветности. Содержание взвешенных веществ – от 4 до 7 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание солей – на уровне 278 мг/дм<sup>3</sup>, органических веществ (БПК<sub>5</sub>) увеличивалось в мае и августе.

Концентрации иона аммония и нитратов изменялись от 0,37 и 1,16 мг/дм<sup>3</sup> (март) до содержаний ниже предела обнаружения. Максимальная концентрация общего фосфора определена в марте (0,27 мг/дм<sup>3</sup>), в остальные месяцы она была в среднем равна 0,2 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание ионов алюминия за период наблюдения снижалось с 0,052 (март) до 0,022 (октябрь) мг/дм<sup>3</sup>, ионов меди – с 0,05 (март) до 0,0109 (октябрь) мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация железа общего незначительна, ионов марганца изменялась с 0,14 мг/дм<sup>3</sup> (август) до 0,014 мг/дм<sup>3</sup> (март), ионов цинка от 0,036 мг/дм<sup>3</sup> до уровня ниже предела обнаружения.

**Устье канала, включающего сток из оз. Большие Касли, городского и заводского прудов г. Касли (ст. 1).** Минимальное содержание растворенного в воде кислорода – 5,7 мг/дм<sup>3</sup> (июль), в остальные месяцы изменялось от 9,15 до 13,3 мг/дм<sup>3</sup>. Величина рН – в диапазоне от 8 до 9 ед. рН. Цветность воды 44–72 град. цветности. Содержание взвешенных веществ в воде канала изменялось в зависимости от времени года от 6,8 до 50 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация органических веществ, выраженных в показателе ХПК, увеличивалась с 30 мгО/дм<sup>3</sup> (март) до 55 мгО/дм<sup>3</sup> (август). Максимум БПК<sub>5</sub> приходился на июль (5,4 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>), минимум – на март (1,49 мг О<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>).



Содержание элементов азотной группы не превышало ПДКрх. Концентрация фосфора общего максимальна весной ( $0,37 \text{ мг/дм}^3$ ), снижается к началу лета ( $0,12 \text{ мг/дм}^3$ ) и вновь увеличивалась к осени (в среднем  $0,28 \text{ мг/дм}^3$ ). Основная форма, которой представлен общий фосфор – фосфор минеральный. Концентрация фторид-ионов в канале незначительна, ионов алюминия изменялась с  $0,092 \text{ мг/дм}^3$  (март) до  $0,05 \text{ мг/дм}^3$  (октябрь). Содержание железа общего в период наблюдений в пределах  $0,96 - 2,9 \text{ мг/дм}^3$ , ионов марганца  $0,114 - 0,53$ , цинка  $0,015 - 0,084 \text{ мг/дм}^3$ .

**Устье р. Исток (ст. 2).** Река Исток является притоком оз. Иртяш и впадает в него с северного берега, со стороны г. Касли. В воде реки наблюдался явный дефицит растворенного кислорода в начале весны ( $2,55 \text{ мг/дм}^3$ ) и летом ( $1,6 \text{ мг/дм}^3$ ). Водородный показатель изменялся в пределах  $7,35 - 8,25$ . Цветность воды варьировала – от 43 до 87 град. цветности в зависимости от сезона. Содержание взвешенных веществ изменялось от  $80 \text{ мг/дм}^3$  (март) и до незначительного в остальные месяцы ( $18 \text{ мг/дм}^3$ ).

Концентрация органического вещества, выраженная в показателе БПК<sub>5</sub>, колебалась от  $10,5$  в марте до  $2 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$  в остальной период. Величина ХПК была максимальна в марте ( $62 \text{ мгO}/\text{дм}^3$ ), в целом за весь период составляла  $35 - 48 \text{ мгO}/\text{дм}^3$ . Содержание веществ азотной группы за период наблюдений в целом в пределах нормы. Концентрация общего фосфора постепенно увеличивалась с  $0,14$  (март) до  $0,43 \text{ мг/дм}^3$  (июль) и затем снижалась. Органического фосфора в водотоке мало. Концентрация фторид-ионов на уровне  $0,44 - 0,51 \text{ мг/дм}^3$ , ионов алюминия изменялась от  $0,44 \text{ мг/дм}^3$  до  $0,014 - 0,04 \text{ мг/дм}^3$ . Содержание железа общего превышало ПДКрх ( $0,3 \text{ мг/л}$ ). Концентрации ионов меди – от  $0,006$  до  $0,027 \text{ мг/дм}^3$ , ионов марганца – от  $0,019$  до  $0,76 \text{ мг/дм}^3$ .

**Устье протоки, включающей сток из озер Малые Касли и Куташи (ст. 3).** Протока из оз. Малые Касли также является притоком оз. Иртяш и впадает в него со стороны г. Касли. Фактический сток воды наблюдался только в мае. В этот период содержание растворенного в воде кислорода составляло  $8,28 \text{ мг/дм}^3$ , величина рН –  $8,19$ , цветность –  $75$  град. цветности. Минерализация  $420 - 430 \text{ мг/дм}^3$ . Содержание взвешенных веществ –  $2,4 \text{ мг/дм}^3$ . Величина БПК<sub>5</sub> соответствовала нормативу, ХПК составляла  $32 - 33 \text{ мгO}/\text{дм}^3$ . Концентрации ионов аммония в стоке –  $0,21 \text{ мг/дм}^3$ , нитрат-ионов –  $0,64 \text{ мг/дм}^3$ . Содержание фосфора общего в мае составляло  $0,03 \text{ мг/дм}^3$ . Содержание фторидов в стоке –  $0,85 \text{ мг/дм}^3$ . Концентрации ионов марганца, цинка, алюминия, общего железа в мае находились на уровне нормативных. Содержание ионов меди составляло  $0,016 \text{ мг/дм}^3$ .

**Устье протоки из оз. Большая Нанюга, включающего сток из озер Кыштымской системы и прудов г. Кыштыма (ст. 5).** Кислородный минимум в протоке отмечен в марте ( $6,7 \text{ мг/дм}^3$ ). В следующие месяцы наблюде-

ния величина растворенного кислорода изменялась в пределах от 11,11 до 15,3 мг/дм<sup>3</sup>. Величина рН переменчива – от 8,0 до 9,21. Цветность воды колебалась от 138 (май) до 40 град. цветности (август). Содержание взвешенных веществ в протоке незначительное. Содержание солей – от 269 до 395 мг/дм<sup>3</sup>. Показатель БПК<sub>5</sub> на протяжении всего периода наблюдений изменялся от 2,7 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> до 7,6 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. Величина ХПК не опускалась ниже 30 мгО/дм<sup>3</sup>. Концентрация ионов аммония изменялась с 3,1 мг/дм<sup>3</sup> (март) до следовых количеств (октябрь). Содержание нитратов в воде в пределах 0,65–0,77 мг/дм<sup>3</sup> (март – август) до 0,91 мг/дм<sup>3</sup> (октябрь). Нитрит-ионы не обнаружены.

Содержание фосфора общего – от 0,82 мг/дм<sup>3</sup> (март) до 0,23 мг/дм<sup>3</sup> (май). Концентрация фосфора в форме фосфатов держится в диапазоне 0,16–0,76 мг/дм<sup>3</sup>, ионов алюминия – от 0,139 до 0,021 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание железа общего от 0,167 мг/дм<sup>3</sup> до концентраций ниже предела обнаружения, ионов марганца – от 0,49 до 0,124 мг/дм<sup>3</sup>, ионов меди – от 0,043 до 0,0085 мг/дм<sup>3</sup>, ионов цинка – от 0,045 до 0,013 мг/дм<sup>3</sup>.

**Исток р. Течи (ст. 6).** Река Теча вытекает со стороны юго-восточного берега оз. Иртяш в направлении оз. Кызылташ. Дефицита растворенного кислорода в истоке реки не наблюдалось. Величина рН – от 7,97 до 8,45. Цветность воды изменялась от 19 до 44 град. цветности. Высокое содержание взвешенных веществ зафиксировано в марте (26,2 мг/дм<sup>3</sup>), в последующие месяцы их концентрация не превышала 1,5 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание солей варьировало в пределах 304 – 272 мг/дм<sup>3</sup>. Значение БПК<sub>5</sub> в среднем за период наблюдения составило 1,4 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, ХПК – 23 мгО/дм<sup>3</sup>.

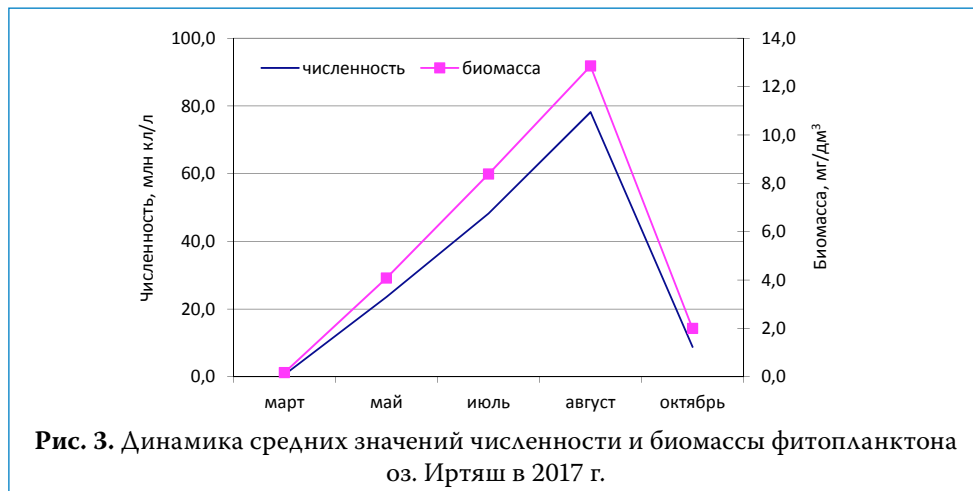
Концентрация ионов аммония за весь период наблюдения в среднем составляла 0,26 мг/дм<sup>3</sup>. Максимальная концентрация нитратов отмечена в марте (0,77 мг/дм<sup>3</sup>), в мае – июле в среднем 0,38 мг/дм<sup>3</sup>, в августе, октябре – 0,68 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание нитритов ниже предела обнаружения. Средняя концентрация фосфора общего за период наблюдений составила 0,18 мг/дм<sup>3</sup>. Органического фосфора мало, основная часть общего фосфора представлена минеральным.

Содержание ионов алюминия изменялось от 0,014 до 0,038 мг/дм<sup>3</sup>, в июне – ниже предела обнаружения, железа общего – от 0,22 до 0,12 мг/дм<sup>3</sup> и ниже. Максимальная концентрация ионов марганца определена в марте – 11,2 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрации ионов меди установлены на уровне 0,041–0,0063 мг/дм<sup>3</sup>, ионов цинка – от 0,034 мг/дм<sup>3</sup> до 1,11 мг/дм<sup>3</sup>.

#### ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОЗЕРА ИРТЯШ

Для полной оценки состояния водной экосистемы оз. Иртяш исследованы следующие биотические компоненты: фитопланктон, хлорофилл «а», высшая водная растительность (макрофиты), зоопланктон, донные беспозвоночные организмы (макрозообентос).

Для оценки состояния оз. Иртяш в 2017 г. (с марта по октябрь) в точках 8–13 (см. рис. 1) отобрано и проанализировано 20 проб фитопланктона. В составе фитопланктона оз. Иртяш обнаружено 116 видов, разновидностей и форм водорослей из 8 отделов наиболее крупных групп водорослей. Согласно литературным источникам, в результате многолетних наблюдений в озере зарегистрировано 359 видов планктонных водорослей [6]. Динамика средних значений численности и биомассы фитопланктона оз. Иртяш в 2017 г. представлена на рис. 3.



По величине биомассы, согласно классификации О.П. Оксийк и соавторов [7], качество воды оз. Иртяш оценивалось от класса качества 1 («предельно чистая») до 4б («сильно загрязненная»). Согласно [8], трофический статус озера изменялся в течение наблюдаемого периода от олиготрофного (март, октябрь) до политрофного (июль, август).

Содержание хлорофилла «а» положено в основу шкал, разработанных для оценки трофического статуса водоемов и качества воды [7, 9–14]. Определение хлорофилла включено в систему мониторинговых наблюдений на водных объектах. В целом за период наблюдений 2017 г. экологическая ситуация на оз. Иртяш при оценке по концентрации хлорофилла «а» была благополучна. Содержание хлорофилла по комплексной экологической классификации качества поверхностных вод суши за вегетационный период квалифицировало трофический статус водоема как переходный от мезотрофного к эвтрофному с классами качества воды от II до III, от «чистой» до «удовлетворительной чистоты».

Материал для исследования зоопланктона был отобран на шести постоянных станциях. В целом видовой состав зоопланктона в пробах доста-

точно типичен для водоемов Урала. По видовому составу зоопланктона и его численности в пробах определен индекс сапробности водоема по методу Пантле и Бука в модификации Сладечека. Исследованный водоем по видам-индикаторам характеризуется как умеренно загрязненный с индексом сапробности, равным 2,3.

Макрозообентос на акватории озера исследован в шести точках, совпадающих с точками отбора воды на определение химического состава, по методическим указаниям «Руководства по методам гидробиологического анализа» [15] и данным литературы [16 – 22]. Численность и биомасса макрозообентоса на станциях наблюдения оз. Иртяш приведены на рис. 4, 5. Таксономический состав макрозообентоса представлен типичными видами Палеарктики.

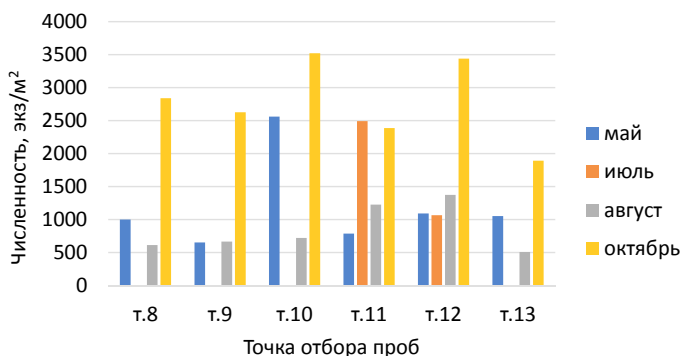


Рис. 4. Динамика численности макрозообентоса за период наблюдения на оз. Иртяш в 2017 г.

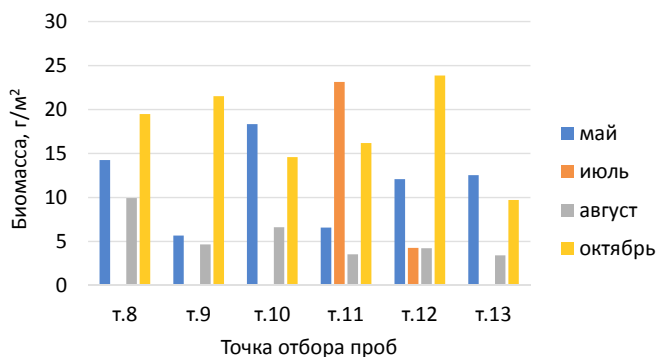


Рис. 5. Динамика биомассы макрозообентоса за период наблюдения на оз. Иртяш в 2017 г.

Результаты обследования макрозообентоса свидетельствуют о том, что экосистема оз. Иртяш находится в хорошем состоянии (40 видов беспозвоночных). Озеро Травакуль (южная часть оз. Иртяш) испытывает негативное воздействие от поступающей из оз. Большая Наного воды: здесь обнаружены наименьшее видовое разнообразие (6 видов) и численность макрозообентоса. В целом водоем принадлежит к категории «высококормных».

### **ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОЗЕРА ИРТЯШ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ**

Оценка состояния оз. Иртяш и его притоков проведена по показателю антропогенной нагрузки (ПАН), учитывающему и гидробиологическое состояние водоема. В табл. 1 представлены значения показателей антропогенной нагрузки, рассчитанной с учетом целевых показателей в соответствии с [5].

В целом вода оз. Иртяш по средним значениям общего ПАН с экологических позиций за период наблюдения оценивается как вода I класса качества, характеризующего устойчивое стабильное состояние водного объекта, при котором процессы самоочищения протекают с высокой скоростью.

С экосистемной точки зрения, оз. Иртяш не нуждается в реабилитационных мероприятиях, направленных на снижение поступления техногенных ингредиентов. С позиций рыбохозяйственного нормирования в озере и его притоках превышены концентрации ионов металлов над ПДК<sub>рх</sub>. Поскольку непосредственные сбросы сточных вод в оз. Иртяш отсутствуют, в дальнейших исследованиях по его реабилитации необходимо обратить внимание на несущие эти ингредиенты притоки, чтобы их максимально инактивировать. При этом необходимо уточнить происхождение ионов железа и марганца, поскольку они могут попадать в озеро в результате естественных геохимических процессов на водосборе.

### **Оценка трофического статуса оз. Иртяш**

При оценке трофического состояния водоема довольно часто используются градационные таблицы, по которым водоем может иметь олиготрофное состояние по концентрации хлорофилла «а» и, например, эвтрофное состояние по прозрачности воды по диску Секки. На практике такие противоречия возникают довольно часто, что заставляет искать более обоснованные оценочные системы. Одной из таких логически обоснованных систем является вероятностная оценка трофического статуса водоема [23]. Ее применение показало, что оз. Иртяш не принадлежит к ультраолиготрофным водоемам. Наибольшая вероятность в 46,25 % указывает на принадлежность водоема к эвтрофному типу. Вторая по величине вероятность в 36,25 % указывает на то, что оз. Иртяш относится к водоему гипертрофного типа. Лишь с вероятностью в 16,25 % озеро оценивается как водоем мезотрофного типа.

**Таблица 1.** Общие значения показателей антропогенной нагрузки и классы качества воды по результатам исследований 2017 г.

Створ	ΣПАН по месяцам, усл. м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>						Класс и среднее значение ΣПАН, усл. м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
	март	май	июнь	июль	август	октябрь	
1. Устье канала, сток из г. Касли	3,2 ХПК, Р <sub>общ</sub>	6,1 ХПК, рН, ВВ ХПК, Мп <sup>2+</sup> , рН	4,0 ХПК, Мп <sup>2+</sup> , рН	12,7 рН, ХПК, Мп <sup>2+</sup> , ВВ	22,7 ВВ, ХПК, Мп <sup>2+</sup> , рН	8,3 ХПК, Мп <sup>2+</sup> , рН	9,5 (II)
2. Устье р. Исток	29,4 ВВ, ХПК, Мп, Fe <sub>общ</sub>	6,6 ХПК, ВВ, СС	4,1 ХПК, СС, Р <sub>общ</sub>	16,0 Мп <sup>2+</sup> , ХПК, ВВ	3,1 ХПК	4,7 ХПК, Мп <sup>2+</sup>	10,6 (II)
3. Устье протоки из оз. Малые Касли	30,6 Мп <sup>2+</sup> , Fe <sub>общ</sub> , ХПК, СС	3,6 ХПК, СС	3,7 ХПК, СС, ВВ	-	-	-	12,6 (III)
4. Устье р. Борзовки	15,0 Мп <sup>2+</sup> , Fe <sub>общ</sub>	2,9 ХПК	-	-	-	-	8,9 (II)
5. Устье протоки из оз. Большая Нанюга	15,5 N(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ), Мп <sup>2+</sup> , Р <sub>общ</sub>	7,4 ХПК, рН, ВВ	-	12,5 рН, ХПК, ВВ	4,7 ХПК, рН	4,0 ХПК, Мп <sup>2+</sup>	8,8 (II)
6. Исток р. Течи	6,0 ВВ, ХПК	1,0 ХПК	3,2 ХПК	6,5 рН	1,6 ХПК	2,9 ХПК, Мп <sup>2+</sup>	3,5 (I)
7. Протока из оз. Ир-тяш в оз. Бердениш	4,6 Мп <sup>2+</sup> , СС, N(NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	1,0 СС, N <sub>орг</sub>	-	-	-	-	2,8 (I)
8. Оз. Иртяш, о. Адымшикин	0,85 ХПК, Р <sub>общ</sub>	1,7 ХПК, ВВ	-	-	2,4 ХПК, Мп <sup>2+</sup>	2,3 ХПК, N <sub>орг</sub>	1,8 (I)
9. Оз. Иртяш, о. Светляк	0,95 ХПК, Р <sub>общ</sub>	1,34 ХПК, N <sub>орг</sub>	-	-	2,49 ХПК, Мп <sup>2+</sup>	1,95 ХПК	1,7 (I)
10. Оз. Большое Проволочное	1,4 ХПК, СС, Р <sub>общ</sub>	1,6 ХПК	-	-	8,0 ХПК, Мп <sup>2+</sup> , ВВ	1,2 ХПК, Р <sub>общ</sub>	3,0 (I)
11. Оз. Иртяш, п-ов Моськин	0,75 ХПК, Р <sub>общ</sub>	1,8 ХПК, ВВ	1,2 ХПК, ВВ	13,4 рН	5,0 Ап <sup>3+</sup> , ХПК	1,3 ХПК, Р <sub>общ</sub>	3,9 (I)
12. Плес оз. Иртяш у г. Озерска	1,2 ХПК, Р <sub>общ</sub>	1,7 ХПК, ВВ	1,9 ХПК, Мп <sup>2+</sup>	14,4 рН	3,0 ХПК, Мп <sup>2+</sup>	1,5 ХПК, Р <sub>общ</sub>	4,0 (I)
13. Оз. Травакуль	1,3 ХПК, Р <sub>общ</sub>	2,3 ХПК, ВВ	-	-	2,5 ХПК, Мп <sup>2+</sup>	2,1 ХПК, НП	2,0 (I)



В итоге можно уверенно предположить, что трофическое состояние оз. Иртяш будет стабильно эвтрофным, но в маловодном году проявится тенденция по смещению трофического статуса к гипертрофному типу. В многоводный год произойдет небольшое смещение статуса в зону мезотрофии.

Особый интерес представляет модель, разработанная В.В. Бульоном [24], позволяющая спрогнозировать не только трофическое состояние водоема, но и оценить интенсивность продукционных процессов. Использование модели В.В. Бульона [25] показало, что оз. Иртяш однозначно принадлежит к эвтрофному типу водоемов.

Таким образом, комплексная оценка состояния оз. Иртяш продемонстрировала, что оно является эвтрофируемым водоемом. Поскольку продукционные процессы в озере лимитированы содержанием общего фосфора, то, согласно «Пособию...», следует определить удельную фосфорную нагрузку, чтобы по ее величинам установить трофический статус водоема. Для выбора оптимальных методов олиготрофизации необходимо определить источники потоков фосфора и провести их ранжирование по степени воздействия (массе приносимых биогенов).

### Определение удельной фосфорной нагрузки

Выбор оптимальных реабилитационных методов для малопроточного водоема определяется на основе данных о суммарном потоке фосфора в водное тело водоема и его средней глубине с применением схемы Фолленвайдера (рис. 6). Эта схема может быть использована для определения величины удельной нагрузки для достижения заданного трофического уровня и, следовательно, выбора метода реабилитации проблемного водоема.

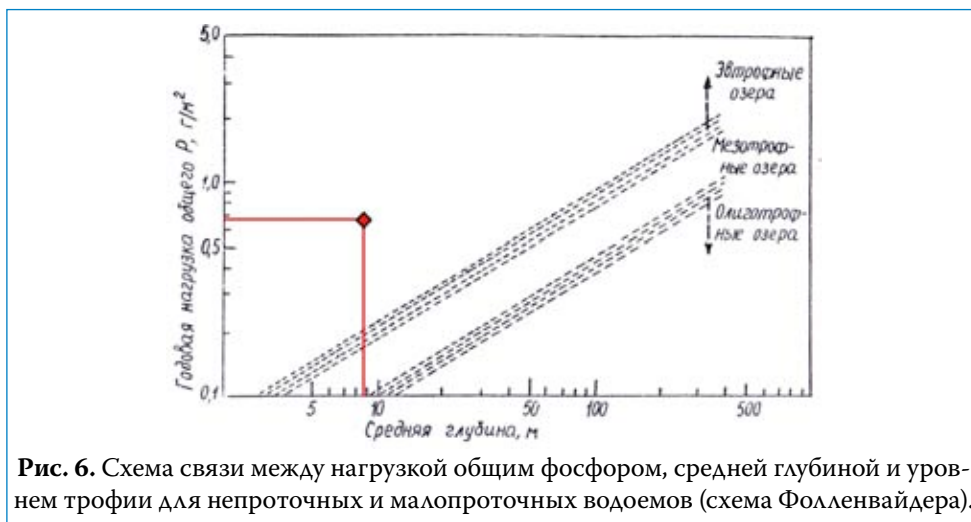


Рис. 6. Схема связи между нагрузкой общим фосфором, средней глубиной и уровнем трофии для непроточных и малопроточных водоемов (схема Фолленвайдера).

Удельный поток фосфора (общего) в водные массы водоема  $\Gamma_{\text{СУМ}}$  (г/м<sup>2</sup> год) определяется в соответствии с п. 5 «Порядка действий при выборе метода реабилитации водоемов», изложенного в «Пособии ...». Поступление фосфора за год определяется как взвешенная величина по расходам воды и по концентрациям фосфора в момент измерения расходов воды.

### **Определение удельной нагрузки на оз. Иртяш общим фосфором за счет поступления из внешних источников**

Притоки в озеро: канал из оз. Большие Касли, р. Исток, канал из оз. Малые Касли, канал из оз. Большая Наного. Количество поступающего фосфора с водой притоков определялось во все фазы гидрологического режима и составило около 5486,208 кг в год. Данная величина не учитывает приток воды из ручьев, подводных и околководных выходов грунтовых вод и ключей.

Выпуски и водозаборы из оз. Иртяш: р. Теча, водозабор ММПКС г. Озерска, водозабор ПО «Маяк», летние водозаборы садов северного и восточного берега оз. Иртяш (1172 уч. Каслинского муниципального р-на и 6288 участков в черте г. Озерска). Вынос общего фосфора с водой выпусков и водозаборов составил 8400,329 кг. Таким образом, выпуски и водозаборы из озера выносят за год фосфора больше, чем его поступает с русловым стоком.

### **Поступление фосфора с поверхностным стоком с водосборной площади**

Водосбор оз. Иртяш дренируется слабо, вся вода попадает в расположенные рядом озера. На этой территории можно выделить два участка. Частная водосборная площадь участка, включающего сток через оз. Малые Касли, составляет 27,72 км<sup>2</sup>. Озерность, с учетом площади крупных озер Малые Касли и Куташи, – 17 %, заболоченность – 5,3 %. Частная водосборная площадь западного берега – 116,8 км<sup>2</sup>, озерность с учетом крупных озер на водосборе – 11,78 км<sup>2</sup> (10,1 %). На основе картографического материала можно принять допущение, что оба участка – 27,72 и 116,8 км<sup>2</sup> – представляют собой залесенные территории с небольшой заболоченностью.

Для определения количества поступающего с данных территорий фосфора использован расчетный метод с применением следующего уравнения [26]:

$$\Pi_{\text{тер}} = C \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot F_n \quad (6)$$

где  $C$  – средний вынос фосфора в зависимости от вида и состояния водосборной площади [26];

$k_4$  – коэффициент уклона территорий, определение производят согласно [27];

$k_5$  – коэффициент удаленности рассматриваемой территории, определяется по уравнению  $K_5 = 3,28 \cdot e^{-Bx}$ , где  $B$  – 1,57 км<sup>-1</sup>,  $x$  – расстояние (км) от центра рассматриваемой площадки водосбора до ближайшего уреза воды. Для частного водосбора оз. Иртяш такое расстояние можно принять равным 2 км.

Для оз. Иртяш использовали следующие переменные:  $C = 0,025$  кг/га год;  $k_4 = 0,75$ ;  $k_5 = 0,142$ . Расчеты показали, что поступление общего фосфора с площади частного водосбора оз. Иртяш за год составило 384,785 кг.

### Определение удельной нагрузки общим фосфором за счет поступления из внутренних источников

Удельный поток фосфора из затопленной древесины: ориентировочное количество затопленной древесины – 0,01 кг/м<sup>2</sup>. Согласно «Пособию...», количество поступающего фосфора из затопленной древесины составит 107,054 кг/год. Удельный поток фосфора – 0,002 г/м<sup>2</sup> год.

Удельный поток фосфора из донных отложений, обусловленный окислением депонированного в них стойкого органического вещества, определяется либо по уравнению (7), либо на основании данных лабораторного эксперимента.

$$P_{дтв} = \left( \sum_1^i [Aqt_{д}(T_2 - T_1) \frac{qn}{Kок} \sqrt{Kit \cdot B(t^0)_{д} \cdot ПО_{д} \cdot Аж \cdot К_{д}} ] i \right) / F \quad (7)$$

где  $i$  – число отрезков времени, на которые делится год;

$T_1$  и  $T_2$  – моменты начала и окончания конкретного отрезка времени, сут;  
 $Aqt_{д}$  – усредненное по времени от  $T_1$  до  $T_2$  и по акватории содержание фосфора в сухом органическом веществе верхнего пятисантиметрового слоя донных отложений, гР/г сухого вещества;

$qn$  – усредненная по времени от  $T_1$  до  $T_2$  и по акватории концентрация кислорода в придонном слое воды, гО<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>;

$Kit$  – усредненная по времени и по акватории константы окисления стойкого органического вещества для верхнего пятисантиметрового слоя донных отложений, равен 4,  $2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/гО<sub>2</sub> сут;

$B(t^0)_{д}$  – усредненная по времени от  $T_1$  до  $T_2$  и по акватории температурная поправка для донных отложений;

$ПО_{д}$  – усредненная по времени и по акватории перманганатная окисляемость верхнего пятисантиметрового слоя донных отложений, гО<sub>2</sub>/м<sup>3</sup>;

$Аж$  – усредненная по времени и по акватории объемная доля осадков фазы в верхнем слое донных отложений;

$К_{д}$  – коэффициент диффузии кислорода в донных отложениях, равный  $4,72 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/сут;

$Кок$  – кислородный коэффициент, показывающий сколько весовых частей кислорода требуется на окисление одной весовой части сухого органического вещества, равный 1,47 гО<sub>2</sub>/г орг. вещества;

$F$  – площадь донных отложений, м<sup>2</sup>.

Для оз. Иртяш были рассчитаны или измерены необходимые данные для вычисления величины поступления фосфора из донных отложений. В итоге искомый удельный поток составил 0,04439 гР/м<sup>2</sup> год, т. е. из донных

отложений при разложении стойкого органического вещества за год в водоем поступает 0,04439 гР/м<sup>2</sup>, при пересчете на все озеро – 2374,865 кг/год.

Удельный поток фосфора из окисленного органического вещества фитопланктона рассчитывается по формуле (г/м<sup>2</sup> год):

$$\Pi_{\text{фл}} = \sum_1^i [0,028 \cdot B_{\text{ср}} \cdot a_{\text{qf}} (T_2 - T_1)]_i, \quad (8)$$

где  $B_{\text{ср}}$  – усредненная по времени от  $T_1$  до  $T_2$  и по объему водоема сырая биомасса фитопланктона, г/м<sup>3</sup>;

$a_{\text{qf}}$  – доля фосфора в биомассе фитопланктона; усредненное значение – 0,0085 гР/г биомассы (~1 %);

$(T_2 - T_1)$  – период, принятый в 150 дней сезона летней вегетации.

Усредненная биомасса фитопланктона оз. Иртяш за летний период составила 5,657 г/м<sup>3</sup>. Следовательно, удельный поток фосфора из фитопланктона равен 0,201955 г/м<sup>2</sup> год. Этот поток формируется за счет кругооборота фосфора, поступающего в водоем и участвующего в формировании биомассы фитопланктона в течение всего вегетационного периода. На сумме валового поступления этот поток не отражается, поскольку участвующий в формировании биомассы фитопланктона фосфор поглощается из водной массы, возвращается в нее при отмирании одного вида водорослей и формирует биомассу альгоценоза, приходящего ему на смену. Удельная нагрузка составит 0,202 г/м<sup>2</sup> год.

Поток фосфора из донных отложений при разложении и окислении органического вещества макрофитного происхождения рассчитывается по уравнению (9), г Р/м<sup>2</sup>·год:

$$\Gamma_{\text{н.м.}} = P_m \cdot A_{\text{ввр}} \cdot \text{ОВ}_{\text{ввр}}$$

где  $P_m$  – усредненная по акватории годовая продукция макрофитов, растущих на единичной площадке дна (сухой вес), г/м<sup>2</sup>;

$A_{\text{ввр}}$  – доля фосфора в биомассе макрофитов накануне их отмирания (усредненное значение), г Р/г биомассы;

$\text{ОВ}_{\text{ввр}}$  – доля нестойкого органического вещества в биомассе макрофитов накануне их отмирания (усредненное значение), равная 0,6.

Определенная годовая продукция погруженных макрофитов для оз. Травакуль, являющегося основной зарастающей акваторией системы, составляет 1170 г/м<sup>2</sup> · 700000 м<sup>2</sup> = 819000 кг, прибрежно-водных – 1056 г/м<sup>2</sup> · 500000 м<sup>2</sup> = 528000 кг, т. е. годовая продукция погруженных макрофитов равна 0,3276 кг/м<sup>2</sup>, воздушно-водных – 0,2112 кг/м<sup>2</sup>. Поступление в оз. Травакуль фосфора из погруженных макрофитов составит 480,261 мгР/м<sup>2</sup>, из прибрежно-водной растительности – 340,877 мгР/м<sup>2</sup>.

Опираясь на эмпирические данные, можно утверждать, что более глубоководная восточная половина оз. Иртяш воспроизводит в два раза меньше продукции макрофитов, а, следовательно, и фосфорной нагрузки на озеро.

С учетом понижающего коэффициента 0,6 для более низкой продукции макрофитов в восточной части озера, общий поток фосфора от разложения произрастающих макрофитов составит 26358,530 кг. Удельная фосфорная нагрузка – 0,493 гР/м<sup>2</sup>·год.

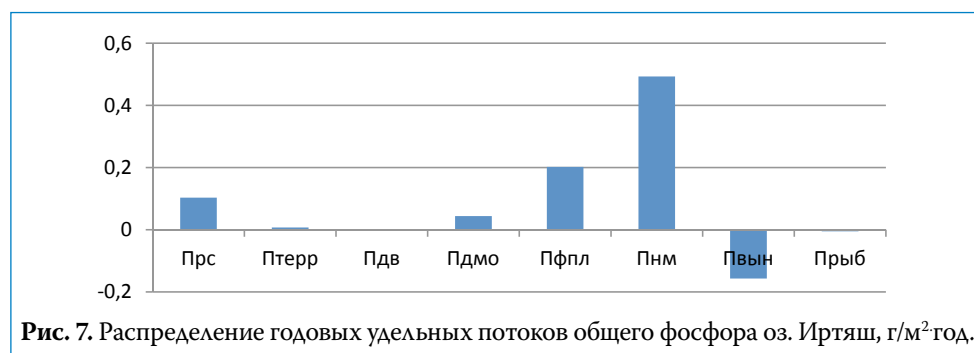
По данным ФГБК «Камуралрыбвод» вылов рыбы в оз. Иртяш за три года (2011–2013 гг.) составил 117317 кг/год. Таким образом, в среднем за год с рыбной продукцией из оз. Иртяш выносятся 258,097 кг фосфора.

Величины потоков общего фосфора в оз. Иртяш и удельной нагрузки фосфором по результатам исследований 2017 г. представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета потоков фосфора и удельной нагрузки фосфором в оз. Иртяш, 2017 г.

Поток фосфора	Величина поступления от источника, кг/год	Величина удельного потока от источника, гР/м <sup>2</sup> год
П <sub>рс</sub>	5486	0,103
П <sub>терр</sub>	384,79	0,007
П <sub>ав</sub>	107,06	0,002
П <sub>дмо</sub>	2374,87	0,044
П <sub>фп</sub>	0	0,202
П <sub>нм</sub>	26358,53	0,493
<b>Суммарное поступление</b>	<b>34711,25</b>	<b>0,851</b>
П <sub>вын</sub>	8400,33	-0,157
П <sub>рыб</sub>	258,097	-0,005
<b>Суммарный вынос</b>	<b>8658,43</b>	<b>-0,162</b>
<b>Количество общего фосфора в водоеме</b>	<b>26056,82</b>	
<b>Удельная нагрузка</b>		<b>0,689</b>

На рис. 7 представлено графическое распределение годовых удельных потоков общего фосфора в оз. Иртяш.



**Рис. 7.** Распределение годовых удельных потоков общего фосфора оз. Иртяш, г/м<sup>2</sup>год.

## Определение трофического уровня оз. Иртыш и класса качества его воды

Озеро Иртыш является малопроточным водоемом. Годовой сток по р. Теча в сумме с водозабором воды всеми водопользователями – 42,37 млн м<sup>3</sup>/год. Объем воды в озере равен 0,47 км<sup>3</sup>. Соответственно, период водообмена составляет 11,093 лет, коэффициент водообмена – 0,09.

Предложенное «Пособие...» рекомендует определять трофический уровень по схеме Фолленвайдера (рис. 6) для непроточных и малопроточных водоемов. Суммарное поступление общего фосфора в водоем составляет 26056,82 кг/год. Удельный поток общего фосфора на единицу площади – 0,689 гР/м<sup>2</sup> год.

Таким образом, по фосфорной нагрузке оз. Иртыш принадлежит к эвтрофным озерам. По усредненной концентрации хлорофилла «а» в летний период 16,6 мг/л озеро является типичным мезотрофным водоемом. По усредненной биомассе фитопланктона за летний период (8,6 мг/л) оз. Иртыш относится к типичным эвтрофным водоемам. По коэффициенту относительной прозрачности (0,2967) – к оптически мелководным озерам фитопланктонного типа.

С экосистемных позиций качество воды в оз. Иртыш по химическим ингредиентам не вызывает беспокойства. На всей акватории средний показатель ПАН характеризует качество воды как 1-й класс. Необходимость в дополнительных мерах по снижению поступления загрязняющих веществ в озеро отсутствует.

### ВЫБОР МЕТОДА РЕАБИЛИТАЦИИ ОЗЕРА ИРТЯШ

Самой актуальной проблемой оз. Иртыш является его интенсивное «цветение» в маловодные и жаркие годы. Нивелировать такую склонность озера полностью не представляется возможным. Теоретически это можно сделать, если повысить среднюю глубину водоема в среднем до 50 м. В этом случае озеро перейдет в статус мезотрофного водоема. Также можно попытаться снизить потоки фосфора в озеро и внутри водоема. Однако самый большой поток фосфора дают макрофиты (58 % всей фосфорной нагрузки), и если удалить все макрофиты (теоретически), водоем обретет возможность поменять свой статус на мезотрофный. На практике такие манипуляции не могут быть реализованы.

Предотвращение зарастания макрофитами оз. Травакуль, например, углублением 120 га мелководной зоны на 1–15 м, практически не приведет к заметному уменьшению удельной фосфорной нагрузки (уменьшится на 0,009 гР/м<sup>2</sup> год) и на средней глубине водоема (изменение в пределах ошибки измерения), что фактически не скажется на трофическом статусе оз. Иртыш. Следовательно, наиболее доступный метод снижения трофического статуса озера – снижение внешней нагрузки, основная доля которой поступает с притоками.



Следует отметить, что, в соответствии с расчетом удельная фосфорная нагрузка, формируемая внешними притоками, составляет  $0,103 \text{ гР/м}^2 \text{ год}$ . Уменьшение поступления общего фосфора из этих источников даже на 90 % приведет к снижению общей фосфорной нагрузки на  $0,092 \text{ гР/м}^2 \text{ год}$ , что в заметной степени не скажется на общей фосфорной нагрузке, т. е. трофический статус озера изменится незначительно. Однако это не означает, что источники внешнего поступления фосфора – озера Большая Наного и Большие Касли – не должны быть защищены от поступления биогенов, поскольку в них формируются свои экосистемы, критические нагрузки для которых значительно ниже, чем для оз. Иртяш.

Одна из возможностей значительно сократить удельный поток фосфора в воду оз. Иртяш заключается в том, чтобы глубину всех мелководий, на которых растут высшие водные растения, довести до 1,5–2,0 прозрачностей воды, при которой произрастание растений значительно сократится.

На момент исследования водоема в 2017 г. вектор процессов в отношении фосфора был направлен на постепенный вынос его из оз. Иртяш. Ежегодный приток из внешних источников в озеро составляет 5870,79 кг фосфора, тогда как вынос – 8658,43 кг, т. е. ежегодно экосистема озера теряет порядка 2787,64 кг фосфора от общей фосфорной нагрузки на водоем. Таким образом, в оз. Иртяш наблюдается процесс медленного поступательного движения к мезотрофии, происходит самовосстановление экологического состояния озерной системы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам реализации порядка действий при выборе метода реабилитации водоемов, изложенного в «Пособии ...», на оз. Иртяш установлено, что в результате антропогенного воздействия и маловодных лет последнего десятилетия в озере начали проявляться процессы, характеризующие его как эвтрофный водоем (2013–2015 гг. – интенсивное «цветение», появление в воде запаха геосмина, помехи в системе водоподготовки питьевой воды).

Анализ полученных результатов показал, что в настоящее время качество воды в оз. Иртяш по химическим ингредиентам с экосистемных позиций не вызывает беспокойства. На всей акватории средний показатель ПАН характеризует класс качества воды как 1-й. Необходимости в дополнительных мерах для снижения поступления техногенных ингредиентов в озеро нет.

Что касается улучшения трофического состояния, то нивелировать склонность водоема к интенсивному «цветению» водорослями в маловодные и жаркие годы какими-либо технически и экономически целесообразными средствами полностью не представляется возможным. Например, для перехода озера в статус мезотрофного его среднюю глубину необходимо увеличить примерно до 50 м. В этом случае озеро перейдет в статус ме-

зотрофного водоема. В этот же статус водоем можно перевести удалив из озера все макрофиты, что на практике невозможно при фактических морфологических характеристиках озера. Значительное сокращение удельного потока фосфора в воду озера возможно при углублении всех мелководий – мест произрастания высшей водной растительности до 1,5–2,0 прозрачных вод. Уменьшение поступления общего фосфора из внешних источников даже на 90 % в заметной степени не скажется на общей фосфорной нагрузке, т.е. трофический статус озера изменится незначительно. С другой стороны, источники внешнего поступления фосфора – озера Большая Наюга и Большие Касли, должны быть защищены от поступления биогенов, поскольку в них формируются свои экосистемы.

В настоящее время в оз. Иртяш наблюдается процесс медленного поступательного движения в сторону мезотрофии, т. е. в результате внешних и внутренних процессов происходит самовосстановление экологического состояния озерной системы.

Использование балансового принципа оценки и прогноза состояния малопроточных водоемов не является новым, однако данная работа отличается тем, что впервые комплексное исследование проведено пошагово с использованием унифицированной методики – «Пособия по выбору приоритетных действий, направленных на экологическую реабилитацию водоемов». Благодаря выполненной работе стало понятно, что можно реализовать и куда направить силы и средства для улучшения экологического состояния оз. Иртяш, а чего нельзя делать и какие мероприятия не стоит даже пытаться воплощать во избежание финансовых и ресурсных потерь.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов А.Н. Выбор приоритетных действий, направленных на реабилитацию непроточных и малопроточных озер // Водное хозяйство России. 2017. № 5. С. 68–89
2. Фальковская А.Н., Каминский В.С., Пааль А.А., Грибовская И.Ф. Основы прогнозирования качества поверхностных вод. М.: Наука, 1982. 182 с.
3. Григорьева И.А., Ланцова И.В., Тулякова Г.В. Геоэкология Иваньковского водохранилища и его водосбора. Конаково: ИД «Булат», 2000. 248 с.
4. Старцев В.В. По Южному Уралу. Челябингиз, 1948. 145 с.
5. ГОСТ Р 57075 – 2016. Методология и критерии идентификации наилучших доступных технологий водохозяйственной деятельности. М.: Стандартинформ, 2016.
6. Отчет о НИР «Разработка рыбоводно-биологического обоснования зарыбления водоема питьевого водоснабжения озера Иртяш Челябинской области рыбами-биомелиораторами с целью улучшения качества воды». Госрыбцентр, УрНИИ водных биоресурсов и аквакультуры. Екатеринбург, 2014. 38 с.
7. Оксийук О.П., Жукинский В.Н. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. Вып. 4. С. 62–76.

8. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
9. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. Минск: Изд-во Университетское, 1960. 329 с.
10. Бульон В.В. Первичная продукция планктона и типология озер Монголии // Водные ресурсы. 1985. Т. 1. С. 170–175.
11. Трифонова И.С. Оценка трофического статуса водоемов по содержанию хлорофилла а в планктоне // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. С. 158–166.
12. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnol. Oceanogr. 1977. Vol. 22. No. 2. P. 361–369.
13. Vollenweider R.A. Das Nährstoffbelastungsconzept als Grundlage für den eutrophierungs-prozess stehender Gewässer und Talsperren // Zeitschrift für Wasser und Abwasser Forschung. 1979. Bd. 12. No 2. P. 46–56.
14. OECD. Eutrophication of waters. Monitoring, assessment and control. Paris. 1982. 155 p.
15. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 240 с.
16. Определитель беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 1. Низшие беспозвоночные / под ред. С.Я. Цалолыхина. СПб.: РАН, 1994. 400 с.
17. Определитель беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 3. Паукообразные. Низшие насекомые. СПб.: РАН, 1997. 448 с.
18. Определитель беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. Высшие насекомые (двукрылые). СПб.: РАН, 1999. 1000 с.
19. Определитель беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые (ручейники, чешуекрылые, жесткокрылые, сетчатокрылые, большекрылые, перепончатокрылые). СПб.: РАН, 2001. 840 с.
20. Определитель водных беспозвоночных Европейской части СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 510 с.
21. Askew R.R. The dragonflies of Europe. Harley Books, 1988. 213 p.
22. Edington J.M., Hildrew A.G. A key to the caseless caddis larvae of the British Isles with notes on their ecology / Freshwater Biological Association. Scientific Publication. 1981. P. 43–97.
23. Premazzi G., Cardoso A.C. Criteria for the identification of freshwater subject to eutrophication. Final Report EI-JRC I-21020 Ispra ITALY, European Commission, 2001. 66 p.
24. Бульон В.В. Влияние ключевых биотических и абиотических факторов на рыбопродуктивность водоемов. Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды // Мат-лы II Междунар. науч. конф. 22-26 сент. 2003. Минск: БГУ, 2003. С. 15–18.
25. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. Л.: Наука, 1983. 150 с.
26. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. Т. 2. ВИНТИ. М., 1975. 200 с.
27. Рекомендации. Расчет поступления биогенных элементов в водоемы для прогноза их эвтрофирования и выбора водоохраных мероприятий. М.: Росагропромиздат, 1989. 48 с.

**Сведения об авторах:**

Попов Александр Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: pan1944@rambler.ru

Павлюк Тимур Евгеньевич, канд. биол. наук, заведующий сектором гидробиологических исследований, отдел научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: T.Pavluk@mail.ru

Мухутдинов В.Ф., канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, отдел научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: muhutdinov1@rambler.ru

Е.В. Загайнова, научный сотрудник, отдел научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: ermine1987@yandex.ru

А.С. Полыгалов, научный сотрудник, отдел научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: ves\_1982@mail.ru

В.В. Сандалова, научный сотрудник, отдел научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: imanova.92@mail.ru

О.А. Милицына, младший научный сотрудник, отдел научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: 35oam66@mail.ru

Е.А. Бутакова, научный сотрудник, отдел научно-методического обеспечения восстановления и охраны водных объектов, ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов» (ФГБУ РосНИИВХ), 620049, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 23; e-mail: butakova77@mail.ru