

УДК: 556.18:626/628

ПОСТУПЛЕНИЕ ФОСФОРА В ИСКУССТВЕННЫЕ ВОДОЕМЫ КАЛМЫКИИ ОТ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

© 2019 г. С. С. Уланова^{1,*}, Н. М. Новикова^{2,**}

¹Институт комплексных исследований аридных территорий
Элиста, 358005 Россия

²Институт водных проблем РАН
Москва, 119333 Россия

*e-mail: svetaulanova@yandex.ru; **nmnovikova@gmail.com

Поступила в редакцию 24.12.2018 г.

После доработки 24.12.2018 г.

Принята к публикации 27.12.2018 г.

Искусственные водоемы в Калмыкии, располагающей ограниченными водными ресурсами, создавались для целей питьевого водоснабжения населения, животноводства, ирригации. В настоящее время они сильно загрязнены биогенными веществами. Приведены выполненные расчеты, которые подтверждают предположение, что именно животноводство (водопой скота и стоки от животноводческих стоянок), развивающееся на водосборе и поставляющее 1–2 т, или от 20 до 700 г на 1 м² водного фосфора в год в отсутствие других загрязнителей — основная причина того, что содержание фосфора во всех рассмотренных водных объектах превышает предельно допустимую концентрацию, установленную для рыбохозяйственных водоемов (ПДК_р), в десятки тысяч раз. Наибольшая доля (80%) в общем объеме поступающего фосфора — от крупного рогатого скота. Нагрузки по фосфору превышают допустимые и критические значения для функционирования водной экосистемы на 1–3 порядка, создают условия для эвтрофикации и делают воды этих водохранилищ непригодными для питьевого водоснабжения, в том числе и для водопоя скота.

Ключевые слова: водохранилища, загрязнение, животноводство, водосборная территория, фосфор, расчетные, критические, допустимые значения.

DOI: 10.31857/S0321-0596466629-637

ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы Калмыкии ограничены и нестабильны во времени, поэтому для обеспечения питьевого водоснабжения населения, животноводства, ирригации создавались искусственные водоемы. Для этого использовались воды местного речного стока и привлекались воды рек соседних районов. Эти водоемы в большинстве своем характеризуются небольшими размерами, мелководны, имеют замедленный водообмен. Они чувствительны к антропогенным нагрузкам и представляют собой один из наиболее уязвимых элементов природной среды в условиях аридных ландшафтов.

Воздействие на водные экосистемы водохранилищ зависит от вида их использования. На водоемах хозяйственно-питьевого назначения проводится забор воды, и это обуславливает нестабильность уровня и водного зеркала, и запасов воды. На водоемах ирригационного назначения также производится отбор воды, но частично реч-

ная вода пополняется водами коллекторно-дренажного стока, поэтому здесь также нестабильны гидрологические характеристики, колеблется минерализация. При использовании водоемов для товарного рыборазведения и для водопоя скота происходит биогенное загрязнение водоемов. В первом случае это делается преднамеренно, для повышения рыбопродуктивности, во втором — это неизбежное следствие водопользования животноводческих предприятий в аридных районах. В Калмыкии практически все водоемы используются для водопоя скота. При водопое происходит прямое поступление естественных (физиологических) отходов скота, содержащих избыточное количество ионов аммония, калия, кальция, магния, фосфора, что приводит к повышению трофности водоемов, деградации качества вод и снижению ресурсного потенциала водоема. Кроме того, на побережьях и на водосборной территории расположены животноводческие стоянки, из которых биогенные элементы попадают с поверхностным стоком. Исследования качества воды водохрани-

лиц Калмыкии, проведенные в последние годы [8], выявили очень сильное превышение ПДК_р в воде по биогенным элементам. Так, содержание фосфора в пробах поверхностных вод, отобранных из основных водоемов Калмыкии в 2013 и 2015 гг., превышало ПДК_р в десятки тысяч раз.

Актуальность исследуемой проблемы заключается в том, что, несмотря на неудовлетворительное качество воды водохранилищ, в настоящее время продолжается рост численности скота, и это приводит к дальнейшему усилению антропогенной нагрузки на водоемы, ухудшению качества воды. Поэтому выявление источников поступления загрязняющих веществ и количественные оценки биогенной нагрузки на водоемы необходимы для регулирования и ограничения нагрузок на них.

В этой связи целью данной работы было подтверждение гипотезы о том, что животноводство — основной источник биогенного загрязнения искусственных водоемов Калмыкии. Задачей работы было получение количественных показателей ежегодного поступления фосфора в водоемы от животноводства и сопоставление их с существующим его содержанием в водоемах.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Республика Калмыкия расположена на юго-востоке европейской части России между 40°10' и 44°50' в.д. и между 41°40' и 47°35' с.ш. Ее общая площадь 75,9 тыс. км². Географическое положение республики определяет основные черты ее природы: резко континентальный семиаридный и аридный климат, который является первопричиной преобладания на территории Калмыкии природных климатических зон степей и пустынь. На основе анализа гидрографической сети и всего комплекса природных условий выбраны три группы водоемов, рассматриваемые как ключевые объекты, различающиеся по назначению, режиму и ландшафтной приуроченности: Аршань-Зельмень — в условиях сухой степи на восточном склоне возвышенности Ергени; Ханата, Цаган-Нур, Деед-Хулсун — в условиях опустыненной степи на Прикаспийской низменности; Чограй — в условиях сухой степи в Кумо-Маньчской впадине. Все рассматриваемые водоемы, за исключением водохранилища Аршань-Зельмень, — регулируемые, и в них привлекается дополнительно вода из других речных бассейнов, нередко с сопредельных с республикой территорий. Созданные в 1930–1950-х гг., они использовались в качестве источников пи-

тьевого и технического водоснабжения, орошения, промыслового рыболовства, рыбоводства, организованной рекреации. В настоящее время в связи с ухудшением качества их вод изменились и возможности использования.

Засушливый климат, равнинные ландшафты, зависимость наполнения от водоподачи с сопредельных территорий — эти природные и животноводческие антропогенные факторы оказывают влияние на высокую динамичность искусственных водоемов Калмыкии, расположенных в степной и пустынной зонах. Все водные объекты используются для водопоя скота, и на их водосборной территории располагаются скотоводческие стоянки.

Гидрологический режим большинства изучаемых водохранилищ характеризуется нестабильностью объема, водного зеркала, уровня воды, минерализации, высоким испарением, замедленным водообменом, слабой проточностью и, как следствие, в условиях жаркого климата — накоплением химических и токсичных веществ. Исследования авторов [8] показали, что воды всех водоемов по степени засоления относятся к категориям солоноватых (1–10) и соленых (10–50 г/л); по качественному составу, в соответствии с классификацией О.А. Алекина [1], — к классу хлоридных, по группам — к магниевым и натриевым, к III типу ($\text{HCO}_3 + \text{SO}_4 < \text{Ca} + \text{Mg}$). Воды этих водоемов сильно загрязнены биогенными веществами, особенно высоки концентрации фосфора [8], превышающие ПДК_р в водохранилище Аршань-Зельмень у плотины в 38 000 раз, в хвостовой части — в 22 000 раз; в водохранилище Цаган-Нур кратность превышения по фосфору в пробах воды менялась от верхнего бьефа к плотине от 20 000 до 130 000 раз, в водохранилище Деед-Хулсун в разные годы — от 4000 до 69 000 раз, на водохранилище Чограй у плотины и в зоне выклинивания подпора — соответственно в 4600 и 50 000 раз.

Исследования авторов [8] показывают, что по минерализации и содержанию загрязняющих веществ воды искусственных водоемов Калмыкии не всегда отвечают их назначению питьевого, рыбохозяйственного использования, а дополнительные антропогенные нагрузки еще более ухудшают качество воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Загрязнение водоемов биогенными веществами происходит из пространственно рассредоточенных источников, расположенных на

водосборе. Подобный путь поступления загрязняющих веществ называется диффузным [9]. Оценка привноса химических веществ посредством натурных измерений требует огромных материальных и временных затрат, что на практике не всегда осуществимо. Чаще всего влияние диффузных источников определяется расчетным путем с использованием коэффициентов выноса веществ в составе поверхностного стока с водосборной территории с учетом численности поголовья скота [3, 4].

При расчете биогенной нагрузки по фосфору численность поголовья животных на водосборе умножается на суточный выход навоза от каждого животного, на содержание загрязняющих веществ в его навозе и на количество дней в году. В связи с отсутствием необходимых водоохранных сооружений принято, что 10% загрязняющих веществ попадает в озеро [3]. Для определения суточных отходов от животноводства в расчете на одну голову в настоящей работе использованы принятые в литературе нормы (табл. 1).

В соответствии с теоретическими представлениями в современной гидрологии [5], каждая водная экосистема обладает определенной устойчивостью по отношению к внешним воздействиям и, в частности, по отношению к фосфорной нагрузке — показателю, интегрально отражающему степень антропогенного воздействия. Согласно теории эвтрофирования, значимость оказываемой нагрузки определяется допустимой фосфорной нагрузкой для каждого конкретного водоема, при которой озеро сохраняет мезотрофный статус. При критической нагрузке, в два раза превышающей допустимую, озеро переходит в эвтрофное состояние [3, 4].

Исходя из указанных представлений, полученные расчетным путем количественные данные о поступлении фосфора от животноводства в каждый водоем на единицу площади принимаются за фактическую (или реальную) рассчитанную нагрузку, а для оценки значимости ее

Таблица 1. Отходы от одной головы скота разных хозяйственных групп в сутки и содержание в них фосфора (по [3])

Животные	Выход, кг/сут	Содержание фосфора, %
Крупный рогатый скот	35	0.23
Лошади	20	0.23
Овцы и козы	2.8	0.28

вклада в загрязнение водоема она сравнивается с показателями допустимой и критической нагрузки. Для подтверждения выдвинутой концепции о том, что животноводство — основной источник поступления фосфора в водоемы Калмыкии, рассчитанные данные фактической нагрузки сопоставлялись с многолетними данными результатов анализов проб на содержание фосфора, отобранных в воде водоемов.

Фактическая (или реальная) рассчитанная фосфорная нагрузка определяется путем деления общего количества фосфора, поступающего в водоем, на его площадь [3].

Допустимая нагрузка рассчитывается по формуле Диллона—Риглера (1), при этом средняя концентрация общего фосфора принимается равной 0.015 г/м, коэффициент удержания фосфора — равным 0.680 [3]:

$$L_{\text{доп}} = pz\tau^{-1}/(1 - R), \quad (1)$$

здесь p — концентрация фосфора в воде в весенний период, определенная по графику Диллона, равная в Калмыкии 0.015 г/м³; z — средняя глубина озера, м; τ^{-1} — скорость водообмена, определенная для каждого водоема, согласно классификации Б.Б. Богословского [2], в отрицательной степени; R — коэффициент удержания фосфора.

Критическая фосфорная нагрузка — величина, в два раза превышающая расчетную допустимую нагрузку [3].

Сравнение фактической рассчитанной (реальной и расчетной), допустимой и критической фосфорной нагрузки проводилось путем сопоставления полученных количественных значений.

В качестве материалов для исследований послужили собственные данные авторов, собранные во время комплексного геоэкологического мониторинга искусственных водоемов и их экотонных зон вода—суша в 2001–2017 гг. Исследования проводились в рамках разработанной ранее методики сбора данных для геоэкологической оценки искусственных водоемов и их экотонных зон [6, 8]. Во внимание принимались данные по содержанию макроэлементов в водоемах Калмыкии [8]. Расчеты биогенной нагрузки проводились по методике [3], для этого необходимо располагать данными по структурным особенностям исследуемых водосборов и возможным диффузным источникам загрязнения, определяемым по картографическим, фондовым и архивным материалам и уточняемым во

время проведения полевых экспедиционных исследований.

С целью определения гидрометрических параметров площади водного зеркала использовали информацию с космических снимков (искусственный спутник Земли (ИСЗ) Landsat-9). Для обработки и анализа данных космических снимков использовались специальные прикладные программы MapInfo 12.0, MultiSpek W32, Pwis 3.6. Для уточнения положения населенных пунктов в пределах границ водосборной территории использовали векторные слои созданной одним из авторов настоящей статьи Водохозяйственной карты Республики Калмыкии [6]. В Минсельхоз Республики Калмыкии были направлены запросы оперативной информации по состоянию поголовья скота на 01.01.2018 г. по сельским муниципальным объединениям (СМО), расположенным на водосборной территории водохранилищ Аршань-Зельмень, Цаган-

Нур, Деед-Хулсун и Чограй. Полученные данные использованы в расчетах.

Данные о содержании фосфора в воде водоемов и о превышении ПДК_р взяты из [8], они отражают его содержание в 2015 и 2017 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе полученных данных и использованных фондовых материалов рассчитано поступление фосфора с поверхностным стоком от животноводства для основных искусственных водоемов Калмыкии (табл. 2–5).

Водохранилище Аршань-Зельмень — балочный водоем, расположенный на восточном склоне возвышенности Ергени. Это старейший водоисточник в Калмыкии, построенный в 1937 г. для регулярного орошения; питается атмосферными осадками и грунтовыми водами, в привершинной части принимает два

Таблица 2. Поступление фосфора в водохранилище Аршань-Зельмень с поверхностным стоком от животноводческих хозяйств на водосборе

Животные	Количество голов	Отходы от одной головы, кг/сут	Отходы от всех голов по хозяйственным группам, кг/год	Содержание фосфора в отходах, кг/год	Поступление фосфора в водоем, кг/год
Крупный рогатый скот	5529	35	70 632 975	16 245 584	1 624 558.4
Лошади	219	20	1 598 700	447 636	44 763.6
Овцы и козы	8416	2.8	8 601 152	1 978 265	197 826.5
Всего	14 164	57.8	11 798 552	18 671 485	1 867 148.5

Таблица 3. Поступление фосфора в водохранилище Цаган-Нур с поверхностным стоком от животноводческих хозяйств на водосборе

Животные	Количество голов	Отходы, кг/сут	Отходы, кг/год	Содержание фосфора, в отходах, кг/год	Поступление фосфора в водоем, кг/год
Крупный рогатый скот	6071	35	77 557 025	17 838 116	1 783 811.6
Лошади	113	20	824 900	230 972	23 097.2
Овцы и козы	18 715	2.8	19 126 730	4 399 148	439 914.8
Всего	24 899	57.8	20 776 530	22 468 236	2 246 823.6

Таблица 4. Поступление фосфора в водохранилище Деед-Хулсун с поверхностным стоком от животноводческих хозяйств на водосборе

Животные	Количество голов	Отходы, кг/сут	Отходы, кг/год	Содержание фосфора в отходах, кг/год	Поступление фосфора в водоем, кг/год
Крупный рогатый скот	1400	35	17 885 000	4 113 550	411 355
Лошади	90	20	657 000	183 960	18 396
Овцы и козы	16 000	2.8	16 352 000	3 760 960	376 096
Всего	17 490	57.8	17 666 000	8 058 470	805 847

Таблица 5. Поступление фосфора в водохранилище Чограй с поверхностным стоком от животноводческих хозяйств на водосборе

Животные	Количество голов	Отходы, кг/сут	Отходы, кг/год	Содержание фосфора в отходах, кг/год	Поступление фосфора в водоем, кг/год
Крупный рогатый скот	6389	35	81 619 475	18 772 479	1 877 247.9
Лошади	11	20	80 300	22 484	2248.4
Овцы и козы	15 228	2.8	15 563 016	3 579 494	357 949.4
Всего	21 628	57.8	15 723 616	22 374 457	2 237 445.7

притока, начинающихся из родников. Полный объем водохранилища — 29.4 млн м³, полезный — 26.6 млн м³, площадь зеркала при НПУ — 7.4 км², длина плотины — 250 м, высота плотины — 7 м. В теле плотины, по которой проходит федеральная автомобильная трасса Элиста—Волгоград, в 2012 г. организован регулируемый донный водовыпуск. В настоящее время водозабор на орошение прекращен в связи с ухудшением качества воды. Ежегодное испарение составляет 10–12 млн м³, что в сочетании с забором воды на орошение приводит к значительному сокращению зеркала водохранилища в летне-осенний период.

Воды водоема в весенний и осенний периоды 2017 г. имели повышенную минерализацию: в приплотинной части в весенний период — 4.04, в осенний — 7.52 в центральной части — 5.0 и 7.63 г/л соответственно; в зоне выклинивания подпора, куда поступает вода из рек Аршань-Зельмень и Хамхурка, — 4.08 и 7.58 г/л соответственно. Гидрохимический состав вод — магниевое-натриево-хлоридный, рН — 8.2–8.3. Повышенная минерализация и качественный состав солей делают эту воду непригодной для орошения. При использовании вод этого водоема есть большая опасность развития негативных почвенных процессов — натриевого и магниевое осолонцевания. Площадь водохранилища, по данным космической информации (ИСЗ Земли Landsat-9, камера ЕТМ+) на 25.08.2017, составила 2.57 км².

По данным Аршань-Зельменского СМО, на водосборной территории водохранилища содержится немногим более 14 тыс. голов скота и ежегодное поступление фосфора от него в водоем составляет ~2 тыс. т. В общем стаде численно преобладают овцы и козы, но основной источник фосфора — крупный рогатый скот (табл. 2). Поступающий с водосбора фосфор существенно ухудшает качество воды этого водоема. Проведенные ранее исследования [8] показали, что содержание общего фосфора в воде Аршань-

Зельменского водохранилища превышает ПДК_р в 22–38 тыс. раз.

Водоохранилище Цаган-Нур расположено на Прикаспийской низменности. Оно самое крупное в цепи озер в южной части Сарпинской депрессии, оставленной древним руслом Волги. Его ложе вытянуто с С на ЮВ на 45 км при ширине от 0.7 до 1.5 км. Средняя глубина — 1.15 м. Емкость — 90.0 млн м³ при нормально-подпертом горизонте (НПГ), площадь зеркала — 61.5 км². Параметры водоема сильно изменчивы, так как основной источник его питания — вода из р. Волги, поступающая по каналу ВР-1, и она подается нерегулярно. Повторные наблюдения за минерализацией воды водохранилища в режиме ежегодного мониторинга в течение 2012–2017 гг. показали ее нестабильность. В 2015 г. минерализация достигла максимальных значений и составила в апреле 22.13, в сентябре — 73.18 г/л. Это можно объяснить уменьшением водоподдачи из р. Волги, это обусловило также снижение уровня воды и сокращение площади водного зеркала, что подтверждается космическими снимками. В водохранилище минерализация воды обычно возрастает от зоны выклинивания подпора к плотине, так как именно в верхнюю часть водоема поступают распределяющие воды из Волги. Как правило, наиболее высокие значения минерализации воды приходятся на осень. В сентябре 2016 г. минерализация снизилась до 25.77 г/л, но продолжает оставаться выше среднемноголетней. Качественный состав вод в приплотинной части водоема — магниевое-натриево-хлоридный. В 2017 г. не удалось отобрать пробы поверхностных вод вследствие усыхания большей части водоема и превращения его в солончаковую заболоченную местность, что типично для старения естественных водоемов в аридных условиях, когда прекращается их водное питание. Площадь водохранилища, по данным космической информации (ИСЗ Landsat-9, камера ЕТМ+), 25.08.2017 составила 12.57 км².

При расчете поступления фосфора в водохранилище с водосбора (табл. 3) учитывалось суммарное на 2017 г. поголовье скота Тугтунского СМО Кетченеровского района и Цаган-Нурского СМО Октябрьского района. Общее поголовье скота составляет ~25 тыс., что почти в 2 раза больше, чем на Аршань-Зельменском водохранилище. Поступление фосфора в водоем превышает 2 тыс. т в год. В стаде преобладают овцы и козы. Их поголовье в ~3 раза больше, чем поголовье крупного рогатого скота, но основным поставщиком фосфора остается крупный рогатый скот. Предыдущие исследования [8] показали, что основной биогенный загрязнитель этого водохранилища — фосфор и его содержание в воде этого водоема превышает ПДК_р в 4–69 тыс. раз.

Водохранилище Деед-Хулсун расположено в Даванском ландшафтном районе Приергенинско-Сарпинско-Даванской подобласти Прикаспийской области. Водохранилище создано в 1970–1980 гг. в устье р. Яшкуль (площадь водосбора 1938 км²), берущей начало с возвышенности Ергени. Анализ данных шестилетних наблюдений показывает увеличение минерализации поверхностных вод в весенний период с 8.9 в 2012 г. до 11.24 г/л в 2017 г. Химический состав вод — магниевое-натриево-хлоридный. Площадь водохранилища, по данным космической информации (ИСЗ Landsat-9, камера ETM+), 25.08. 2017 составила 12.8 км².

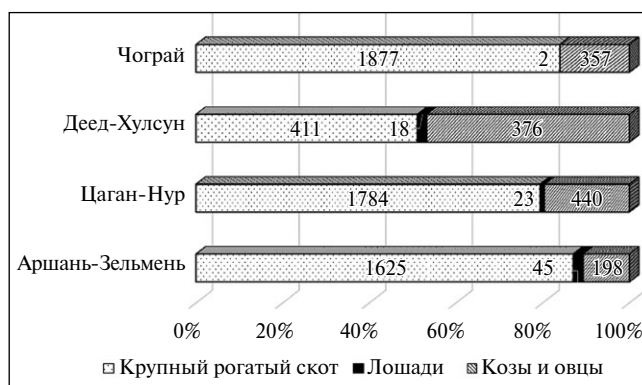
При расчете поступления фосфора в водоем учитывалось поголовье скота Гашунского СМО (табл. 4). Общая численность скота на водосборной территории этого водохранилища составляет >17 тыс. голов, а в водоем от них поступает <1 млн т фосфора. Поголовье овец и коз здесь на порядок больше, чем крупного рогатого скота, но поступление фосфора от этих двух групп домашних животных примерно одинаковое. Общий фосфор в воде водохранилища Деед-Хулсун — основное загрязняющее вещество из всех биогенных элементов, его содержание превышает ПДК_р в разные годы в 30–120 тыс. раз.

Водохранилище Чограй расположено в Кумо-Маньчской впадине, в Восточно-Маньчском ландшафтном районе. Оно создано в 1969 г. в долине р. Восточный Маныч, выработанной в засоленных отложениях морского происхождения. Анализ результатов весенних наблюдений в течение 2012–2017 гг. в приплотинной зоне в месте впадения Кумо-Маньчского канала показал, что минерализация воды не сильно колеблется по годам, так как за этот период ее значения изменились от 1.26 в 2014 г. до 2.47 г/л в 2017 г. [7],

но есть тенденция возрастания с течением времени. Анализ результатов осенних наблюдений (октябрь) выявил низкую эффективность проводимых мероприятий по снижению минерализации водохранилища. В 2012 г. водохранилище спустили и затем вновь наполнили чистой пресной водой. Однако данные шестилетнего мониторинга показали, что минерализация вновь вернулась к прежнему значению. В 2012 г. перед спуском водохранилища до УМО минерализация воды в нем была 2.96, в следующий — 2013 г. снизилась до 1.3, в 2014–2016 гг. оставалась относительно стабильной (~1.6), и в 2017 г. вновь достигла значения 2.47 г/л. По химическому составу воды — гидрокарбонатно-натриево-хлоридные [7]. Площадь водохранилища, по данным космической информации (ИСЗ Земли Landsat-9, камера ETM+), 25.08.2017 составила 114.72 км².

При расчете поступления фосфора в водоем учитывалось суммарное поголовье животных в хозяйствах Чограйского, Зунда-Толгинского и Манцинкецовского СМО (табл. 5), составляющее 21 тыс. голов. Здесь в составе стада преобладают овцы и козы, их число в ~2 раза больше, чем крупного рогатого скота, но при общем количестве поступающего в водоем фосфора, составляющего >2 тыс. т в год, его основной объем дает крупный рогатый скот. Содержание фосфора в воде этого водоема превышает ПДК_р в 46–50 раз.

Анализ рассчитанного количества фосфора, поступающего от животноводческих хозяйств на разных водохранилищах, показывает, что наибольшее его количество поступает с водосборов водохранилищ Цаган-Нур и Чограй, где формируется >2 тыс. т фосфора в год (рисунок). Именно здесь количество голов крупного рогатого скота, овец и коз больше, чем на водосборах других водоемов. Самое меньшее количество фосфора формируется на водосборе водоема



Поступление в водохранилища фосфора от разных видов скота.

Деед-Хулсун (<1 тыс. т фосфора в год), и поголовье крупного рогатого скота здесь существенно меньше, чем на других водоемах, при примерно одинаковом поголовье лошадей. Анализ количества фосфора, поступающего от разных групп животных, показал, что основной поставщик фосфора на всех водохранилищах — крупный рогатый скот (табл. 2–5). Это происходит не только из-за его большой численности, но и потому, что отходы от крупного рогатого скота в расчете на одну голову больше на порядок, чем от овец и коз. Отходы от одной головы лошади близки к таковым от крупного рогатого скота, но в хозяйствах на всех водоемах поголовье лошадей в десятки раз меньше, чем крупного и мелкого рогатого скота.

Для определения фактической (или реальной) фосфорной нагрузки ($\text{г}/\text{м}^2$) общее количество фосфора, поступающего в водоем, делили на его площадь (табл. 6).

Допустимую фосфорную нагрузку находили при известной глубине водоемов по формуле Диллона–Риглера (1). По классификации Б.Б. Богословского [2], водохранилище Аршань-Зельмень отнесли к аккумулятивным водоемам с замедленным водообменом с коэффициентом водообмена 1; водохранилища Чограй, Цаган-Нур и Деед-Хулсун — к слабопроточным аккумулятивно-транзитным водохранилищам с сезонным и многолетним регулированием

с коэффициентом водообмена от 1 до 3 (в среднем — 1.5).

Для водохранилища Аршань-Зельмень со средней глубиной водоема 1.5 м допустимая фосфорная нагрузка следующая:

$$L_{\text{доп}} = (0.015 \text{ г}/\text{м} \times 1.5 \text{ м} \times \times 1^{-1})/1 - 0.680 = 0.07 \text{ г}/\text{м}^2. \quad (2)$$

По аналогии рассчитали допустимые нагрузки для остальных водохранилищ: для Деед-Хулсун со средней глубиной 1.7 м — $0.12 \text{ г}/\text{м}^2$, для Цаган-Нур со средней глубиной водоема 2 м — $0.14 \text{ г}/\text{м}^2$, для Чограй со средней глубиной 2.5 м — $0.18 \text{ г}/\text{м}^2$. Сравнение рассчитанных допустимых нагрузок по фосфору для разных водоемов выявило, что наименьшая нагрузка — на водоеме Аршань-Зельмень, примерно одинаковая — на Деед-Хулсуне и Цаган-Нуре, более высокая — на Чограе (самом крупном и глубоком водоеме). Соответственно распределяются и критические нагрузки, которые по определению превышают допустимые в два раза. Далее сравнивали полученные значения допустимой и критической фосфорной нагрузки на водоем с реальной рассчитанной (табл. 7).

Табл. 7 демонстрирует, что реальная рассчитанная фосфорная нагрузка превышает (в сотни и тысячи раз) значения допустимой и критической на всех рассмотренных водоемах. Максимальное превышение выявлено для водохрани-

Таблица 6. Реальная рассчитанная фосфорная нагрузка на водохранилища Калмыкии

Характеристика	Водоохранилища			
	Аршань-Зельмень	Цаган-Нур	Деед-Хулсун	Чограй
Общее количество фосфора, поступающее с водосбора, г/год	1 867 148 521	2 246 823 565	805 847 000	2 237 445 693
Площадь водоема, м^2	2 570 000	12 570 000	12 800 000	114 720 000
Реальная рассчитанная фосфорная нагрузка, $\text{г}/\text{м}^2$ в год	726.5	178.7	63	19.5

Таблица 7. Превышение реальной рассчитанной фосфорной нагрузки, $\text{г}/\text{м}^2$ в год, на разные водоемы над допустимой и критической

Показатель фосфорной нагрузки	Водоохранилища			
	Аршань-Зельмень	Цаган-Нур	Деед-Хулсун	Чограй
Реальная рассчитанная	726.5	178.7	63	19.5
Допустимая	0.11	0.14	0.12	0.18
Критическая	0.22	0.28	0.24	0.36
Превышение реальной рассчитанной нагрузки над допустимой и критической, раз	3359/1679	993/496	583/292	108/54

лища Аршань-Зельмень; минимальное — для водохранилища Чограй. Такой результат можно объяснить так: несмотря на то, что в Аршань-Зельмень поступает с водосбора меньшее количество фосфора, чем в Чограй, площадь его водного зеркала существенно меньше и реальная рассчитанная фосфорная нагрузка выше.

Превышение реальной нагрузки над допустимой и критической и превышение ПДК_p измеренного содержания фосфора показывают, что минимальному превышению критической нагрузки соответствует и минимальное превышение ПДК_p (характерно для водоема Деед-Хулсун). При большем превышении реальной нагрузки над критической отмечается и большее превышение ПДК_p по фосфору. Это косвенно подтверждает то, что поступление фосфора от животноводческих хозяйств — основной источник загрязнения водоемов фосфором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчеты показали, что поступление фосфора от животноводческих стоянок в искусственные водоемы Калмыкии составляет 1–2 тыс. т в год, а в пересчете на единицу площади водной поверхности — от 20 до 700 г/м². Таким образом, в водохранилища Чограй, Цаган-Нур, Аршань-Зельмень поступает ≥2 тыс. т фосфора в год, и только на водохранилище Деед-Хулсун <1 тыс. т в год. Эти показатели обусловлены высокой общей численностью поголовья скота на водосборах этих водоемов, высокой численностью крупного рогатого скота, дающего наибольший вклад в поступление фосфора. Исключение составляет водоем Деед-Хулсун, куда поступление фосфора от крупного рогатого скота примерно равно его поступлению от овец и коз, так как их поголовье существенно выше.

Из-за разных размеров водоемов нагрузка на единицу площади водного зеркала существенно различается: на самом крупном водохранилище Чограй она оказывается наименьшей (19.5 г/м²), а на водохранилище Аршань-Зельмень при меньшей общей нагрузке, но и существенно меньшем размере водного зеркала — наибольшей (726.5 г/м²).

На всех рассмотренных искусственных водоемах рассчитанная нагрузка по фосфору превышает допустимую и критическую в сотни и тысячи раз. Наиболее высокая нагрузка — на водоеме Аршань-Зельмень, где превышение составило соответственно 3359 и 1679 раз. Наименьшие нагрузки по фосфору характерны для водохра-

нилища Чограй. Здесь реальная рассчитанная нагрузка превышает допустимую в 108, а критическую — в 54 раза.

В отсутствие других загрязнителей доказано, что именно животноводство — основной поставщик фосфора в искусственные водоемы Калмыкии, содержание фосфора во всех искусственных водоемах превышает ПДК_p в десятки тысяч раз.

Нагрузки по фосфору создают условия для эвтрофикации водоемов и делают воды этих водохранилищ непригодными для питьевого водоснабжения, в том числе и для водопоя скота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 270 с.
2. *Богословский Б.Б.* Озероведение. М.: МГУ, 1960. 335 с.
3. *Власов Б.П., Витченко Н.В., Гагина Н.В., Грищенкова Н.Д.* Геоэкологическая оценка природно-ресурсного потенциала антропогенно нарушенных озерных бассейнов: метод. рекомендации. Минск: Изд. центр БГУ, 2015. 44 с.
4. *Власов Б.П., Петрова М.И.* Биогенная нагрузка как фактор формирования экологического состояния озер-водоприемников сточных вод // *Материалы IV Междунар. науч. конф. "Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии"*. Минск: Изд. центр БГУ, 2008. С. 275–277.
5. *Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А.* Гидрология. Учебник для вузов. М.: Высш. шк., 2007. 463 с.
6. *Уланова С.С.* Эколого-географическая оценка искусственных водоемов Калмыкии и экотонных систем "вода-суша". М.: РАСХН, 2010. 263 с.
7. *Уланова С.С., Нажмутдинов С.Н.* Изменение минерализации Чограйского водохранилища по результатам исследований в 2012–2016 гг. // *Материалы XIII Межрегион. науч. практ. конф. "Проблемы устойчивого развития и эколого-экономической безопасности регионов"*, посвященной 25-летию Волжского гуманитарного института. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2017. С. 200–205.
8. *Уланова С.С., Новикова Н.М.* Экологическое состояние искусственных водоемов Калмыкии, оцененное по показателю химического загрязнения ПХЗ-10 // *Вода: химия и экология*. 2017. № 4. С. 10–21.
9. *Чеботарев А.И.* Гидрологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 308 с.

PHOSPHORUS EFFLUENCE IN ARTIFICIAL WATER RESERVOIRS OF KALMYKIYA FROM CATTLE BREEDING COMPANIES

© 2019 S.S. Ulanova^{1,*}, N. M. Novikova^{2,**}

¹ *Institute of Complex research arid areas
Elista 358005 Россия*

² *Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences
Moscow, 119333 Russia*

*e-mail: *svetaulanova@yandex.ru; **nmnovikova@gmail.com*

Received: 24.12.2018

Revised version received: 24.12.2018

Accepted: 27.12.2018

Artificial water reservoirs in Kalmykiya, which has limited water resources, were developed for a potable water supply for the local population, cattle breeding, and irrigation. Currently, they are strongly contaminated by biogenic substances. Calculations are provided in this study that confirm the hypothesis that cattle breeding (watering points of cattle and run-off from cattle breeding areas) developed in the water catchment area suppl 1–2 tons or from 20 to 700 g of phosphorus per 1 m² of water surface per year in the absence of other contaminants; this is the main reason that phosphorus content in all water reservoirs exceeds the maximum allowable concentration established for fishery water reservoirs (MAC_p) by tens of thousands of times. The highest proportion (80%) of the overall volume of incoming phosphorus originates from the bovine cattle. Phosphorus loads exceed the allowed and critical values for functioning of the water ecosystem by from 1 to 3 orders of magnitude, forming conditions for eutrophication and rendering water of these reservoirs unsuitable for potable water supply, including for cattle watering points.

Keywords: water reservoir, contamination, cattle breeding, water catchment area, phosphorus, estimated, critical, allowed values.

DOI: 10.31857/S0321-0596466629-637