

БИОАККУМУЛЯЦИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ НЕКОТОРЫХ ЗАЛИВОВ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА¹

© 2025 г. Е. С. Гришанцева^{а, *}, Л. П. Федорова^б

^аМосковский государственный университет им. Ломоносова, геологический факультет, Москва, 119234 Россия

^бИнститут водных проблем РАН, Ивановская НИС, Конаково Тверской обл., 171251 Россия

*e-mail: shes99@mail.ru

Поступила в редакцию 01.06.2022 г.

После доработки 09.04.2024 г.

Принята к публикации 25.10.2024 г.

Представлены результаты определения объемов биологического накопления микроэлементов (V, Pb, Cr, Co, Mo, Cu, Zn, Ni, Fe, Sr, Mn) в восьми видах и редкоземельных элементов (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) в двух видах высших водных и прибрежно-водных растений трех зарастающих заливов приплотинной части Ивановского водохранилища – Новосельского, Федоровского и Коровинского. Изучен флористический состав растительных сообществ заливов, определены фитомассы доминирующих ассоциаций заросших участков, продукция и площади, занимаемые высшей водной растительностью. Сравнение данных за 1977 с данными 2005 г. показало, что произошло значительное увеличение совокупной годовой продукции за счет роста продукции двух экологических групп макрофитов Ивановского водохранилища – воздушно-водных (гелофитов) и гидрофитов свободноплавающих и укореняющихся со сменой видов-эдификаторов и возрастом ведущей роли воздушно-водных (гелофитных) видов растительности в образовании зон зарастания. В период с 1990 по 2005 г. произошла стабилизация процесса зарастания и продуктивность всех эколого-биологических групп растительности сохранялась на одном уровне. Суммарно в Новосельском, Федоровском и Коровинском заливах в период максимального развития (июль–август) в сухой биомассе макрофитов накапливается 4657.8 кг тяжелых металлов: из них 2.58 V, 1.98 Pb, 9.75 Cr, 0.78 Co, 0.82 Mo, 16.76 Cu, 45 Zn, 6.1 Ni, 1977 Fe, 171 Sr, 2426 кг Mn. В сухой биомассе манника большого и рдеста пронзеннолистного трех заливов связано 0.33 кг редкоземельных элементов. Самая большая масса тяжелых металлов накапливается растительностью Коровинского и Федоровского заливов. В Коровинском заливе, где значительно возрастает доля погруженных укореняющихся видов в совокупной фитомассе, получены самые высокие значения биоаккумуляции тяжелых металлов и редкоземельных элементов. Главными видами-аккумуляторами являются телорез алоэвидный, манник большой и рдест блестящий. Показано, что процесс зарастания заливов, сопровождающийся сменой растительных сообществ, все большим площадным доминированием и увеличением годовой продукции воздушно-водных видов, способствует росту биологической аккумуляции тяжелых металлов.

Ключевые слова: зарастание, продуктивность, водная растительность, Ивановское водохранилище, тяжелые металлы, редкоземельные элементы.

DOI: 10.31857/S0321059625030023 **EDN:** SZAGNK

ВВЕДЕНИЕ

Высшая водная растительность (ВВР) – главный продуцент органического вещества в экосистеме водохранилища, выступает ключевым звеном в биогеохимических циклах как биогенных

элементов, так и токсичных химических элементов. Играя ведущую роль в биогеохимических процессах в экосистеме водохранилища, ВВР способна накапливать в тканях и клетках микроэлементы из воды и донных осадков, изменять формы их нахождения, связывая их и снижая

¹ Часть работы, связанная с аналитическими и биогеохимическими исследованиями, выполнена в рамках Государственного задания МГУ (№ 121071200143-2 “Экспериментальные исследования форм нахождения, адсорбции, миграции и геохимических циклов микроэлементов в гидротермальных системах и водах континентальной литосферы”). Часть работы, связанная с экспедиционными и гидробиологическими исследованиями, выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (FMWZ-2025-0002 “Исследования процессов формирования качества поверхностных и подземных вод, природных и антропогенных механизмов изменения экологического состояния водных объектов, разработка методов и технологий управления водными ресурсами и качеством вод”).

токсичность и миграционную способность их соединений, что влияет на качество воды, способствует процессам самоочищения водоема и улучшает его экологическое состояние. Аккумуляция тяжелых металлов (ТМ) макрофитами происходит не только в результате биоаккумуляции внутри организмов, но и в результате процессов комплексообразования, сорбции и образования осадка на поверхности живых и отмерших растений [14, 21]. Макрофиты в водоемах играют важную роль при формировании трофических цепей [13, 14]. Водная растительность широко используется в целях фиторемедиации как в России, так и за рубежом для восстановления естественных и искусственных водоемов до нормального экологического состояния [19, 33].

Объект исследования — Ивановское водохранилище — одно из самых мелководных и заросших водной растительностью среди Волжских водохранилищ. Большая часть заросших мелководий Ивановского водохранилища приходится на крупные заливы Шошинского и Нижневолжского плесов, а также на отдельные участки Верхневолжского плеса. Именно в Новосельском, Федоровском и Коровинском заливах Нижневолжского плеса находятся максимальные по площади нерестилища рыб [5]. Степень зарастания Ивановского водохранилища ~28% [15, 24], что значительно выше оптимального уровня 8–12% [9], необходимого для устройства нерестилищ фитофильными рыбами. Чрезмерное развитие водной растительности ведет к эвтрофированию водоема, ухудшению биологического и гидрохимического режима. В работе Минеевой Н.М. [11] показано, что в 2005 г. Ивановское водохранилище сохраняло свой эвтрофный статус.

На водохранилищах процесс зарастания и формирования растительного покрова начинается с момента создания водохранилища и продолжается до настоящего времени. Начальная стадия процесса зарастания Ивановского водохранилища описана в работах Калининой А.В., Потапова А.А., Шмелевой Ю.Д. [28], последующее его развитие также достаточно полно освещено в литературе [15, 23, 24, 29]. Видовой состав растительности мелководной зоны Ивановского водохранилища вполне сфор-

мировался уже через двадцать лет с момента его создания и включал 220 видов 53 семейств [28]. В настоящее время список растений пополнился ранее не встречавшимися видами и состоит из 227 видов 55 семейств, включая гибридные виды [15]. Процессы зарастания заливов Ивановского водохранилища хорошо изучены с точки зрения их влияния на гидродинамические условия и процессы формирования донных осадков [7]. Вместе с тем объемы накопления микроэлементов ВВР в процессе зарастания заливов Ивановского водохранилища не определены. Несмотря на то, что Ивановское водохранилище является источником питьевого водоснабжения г. Москвы, на территории его водосбора находятся крупные города, промышленные и сельскохозяйственные предприятия. ТМ наряду с нефтепродуктами, синтетическими поверхностно-активными веществами, пестицидами, солями, фенолами — одни из главных загрязнителей воды, существенно ухудшающих ее качество. Ранее считалось, что редкоземельные элементы (РЗЭ) — слабо и средне распространены в гидросфере и не рассматривались в качестве загрязнителей. В настоящее время РЗЭ используются в высокотехнологичных, стратегических отраслях промышленности (производство электроники и техники), в энергетике, в медицине, сельском хозяйстве, т. е. они могут поступать в окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла от стадии производства до стадии утилизации и объемы их использования, а следовательно, и поступления в окружающую среду постоянно растут [1, 2, 32]. Антропогенные потоки РЗЭ приводят к образованию аномалий в водных экосистемах [32], однако данных об уровнях биоаккумуляции РЗЭ в водной растительности и гидробионтах, о накоплении или передаче по пищевым цепям, о токсичности и их экологической опасности очень мало. Это обуславливает актуальность получения количественной оценки процесса биологического накопления микроэлементов, включая ТМ и РЗЭ, высшей водной растительностью Ивановского водохранилища и ее участия в биогеохимических и миграционных процессах связывания элементов-загрязнителей в водоеме. В предыдущих работах авторов была установлена высокая аккумулирующая способность различных видов водной растительности Ивановского водохранилища по отношению

к ТМ и РЗЭ [2, 22]. Величины коэффициентов биологического поглощения (КБП) различными видами макрофитов относительно донных отложений достигали для Cu 5.7, Zn 31.6, Ni 16.4, Cr 5.6, Pb 7, Co 16.4, Cd 24, Mn 3.7. Для рдеста пронзеннолистного и манника большого КБП РЗЭ относительно воды составляли от 806 до 11266 и от 250 до 3142 соответственно.

Цель настоящей работы – оценка объемов биологического накопления микроэлементов высшей водной растительностью трех зарастающих заливов приплотинной части Ивановского водохранилища (Новосельского, Федоровского, Коровинского). Задачи исследования следующие:

- 1) сравнить годовую продукцию основных эколого-биологических групп водной растительности Ивановского водохранилища в 1977, 1990 и 2005 гг.;
- 2) определить фитомассу и продукцию наиболее массовых видов высшей водной и прибрежно-

во-водной растительности, измерить площади зарастания заливов и оценить запасы надземной фитомассы в заливов – Новосельском, Федоровском, Коровинском;

- 3) рассчитать объемы биологического накопления ВВР микроэлементов: V, Pb, Cr, Co, Mo, Cu, Zn, Ni, Fe, Sr, Mn и РЗЭ: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, а также сравнить аккумулирующую способность доминирующих видов из различных экологических групп.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования водной растительности проводились в 1990 и 2005 гг. во время совместной экспедиции ИВП РАН и кафедры географии Тверского Государственного университета, направленной на изучение аквальных комплексов литоральных участков и защищенных прибрежных мелководий Ивановского водохранилища. Натурные наблюдения проводились в Нижне-



Рис. 1. Карта отбора проб ВВР на Ивановском водохранилище. Δ – места отбора проб растительности для определения микроэлементного состава: 1 – Безбородово, 2 – Низовка-Волга, 3 – Мошковичский зал., 4 – Бабенский залив, 5 – Малый Корчевской залив, 6 – Перетрусовский залив, 7 – Новосельский залив.

волжском плесе Иваньковского водохранилища в трех крупных заливах с высокой степенью зарастания – Новосельском, Федоровском, Коровинском (рис. 1) – в период максимального развития водной растительности в июле–августе. Площадь Новосельского залива составляет 200 га, Федоровского – 350 га, Коровинского – 767.8 га. Максимальная глубина в заливах 2.6, 3.1, 3.56 м соответственно.

В полевых условиях по методике Катанской В.М. [8] были сделаны описания растительности со сбором гербария и определены доминирующие ассоциации ВВР заросших участков. Сбор информации (видовой состав растений, проективное покрытие, высота растений и пр.) проводили на учетных площадях размером 10×10 м. В наиболее однородных частях доминирующих растительных сообществ брали укосы с пробных площадок площадью 1 м² в двух-трех повторностях. Донные осадки заливов были представлены в основном илами с большим количеством растительных остатков.

Для составления картосхем распределения растительных сообществ в заливах использовали катер с малой осадкой и GPS-приемник геодезического класса “мобильный” (“Garmin GPSMAP-62S”, Тайвань), с помощью которого при движении катера вдоль полосы зарослей по периметру заливов отмечали точные координаты границ фитоценозов. Ширину зарослей при возможности выхода на берег измеряли мерным шнуром, при невозможности выхода на берег – глазомерно, в соответствии с методикой [16]. Выбранные участки с помощью вех разбивали на квадраты, в пределах которых на картосхему наносились контуры растительных сообществ, подсчитывали площади, которые занимают виды-доминанты.

В лабораторных условиях укосы с площадок разбирали по видам, надземную часть растений промывали в воде, очищали от взвеси и взвешивали с точностью до 10 г в сыром виде для определения веса пробы при естественной влажности. Затем растения высушивали на воздухе и досушивали в сушильном шкафу при 65°C до постоянной массы, взвешивали с точностью до 0.1 г на лабораторных весах марки “AR 2140

ОНАУС”, Швеция (№ в ГРСИ РФ 18785-00) для определения воздушно-сухого веса пробы. Величины сырой и сухой биомассы определяли как отношение соответствующего веса к площади пробной площадки (1 м²). Рассчитаны средний вес укоса с единицы площади и его стандартная ошибка, выражающая интервальную оценку выборочной характеристики, которая составила 0.21–0.90.

Для определения содержания микроэлементов и РЗЭ в ВВР отбор проб проводился в июле–августе 2005 г. на семи участках: Безбородово, Низовка-Волга, в заливах Мошковический, Бабенский, Малый Корчевской, Перетрусковский, Новосельский (рис. 1). Всего отобрано 77 образцов. Укос отбирали с пробной площадки 1 × 1 м в местах наибольшего зарастания и в лаборатории разбирали по видам. Сухой растительный материал измельчали, отквартовывали для получения средней представительной пробы, озоляли в муфельной печи при температуре 450°C 4.5 ч. Концентрации V, Pb, Cr, Co, Mo, Cu, Zn, Ni, Fe, Sr, Mn в золе восьми доминирующих видов растений определяли методом атомно-эмиссионного спектрального анализа на спектроаналитическом комплексе с многоканальным анализатором спектров (МАЭС, ВМК-Оптоэлектроника) [3]. Определение содержаний РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) проводилось в двух видах – в маннике большом и рдесте пронзеннолистном – методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре “ELEMENT-2” (“Thermo Scientific”) с предварительным разложением золы растений в смеси концентрированных кислот (HF+HNO₃+HCl) [2]. Каждую пробу анализировали в трех повторностях. Пределы обнаружения элементов в анализируемом растворе составляли (нг/л): La – 0.1, Ce – 0.07, Pr – 0.03, Nd – 1.1, Sm – 0.04, Eu – 0.2, Gd – 0.09, Tb – 0.04, Dy – 0.06, Ho – 0.07, Er – 0.04, Tm – 0.02, Yb – 0.02, Lu – 0.03. Величина относительного стандартного отклонения изменялась от 0.1 до 10% в зависимости от области измерения концентрации и элемента. Анализы проводились авторами на кафедре геохимии геологического факультета МГУ. Контроль полноты разложения образцов и оценку правильности результатов анализа проводили по Государственным стандартным образ-

цам ЭК-1 (элодея канадская), ЛБ-1 (листья березы), ТР-1 (травосмесь) производства института геохимии СО РАН.

Камеральная обработка заключалась в составлении карт растительности на топографической основе 1 : 10000, измерении площадей, занимаемых основными формациями водной растительности. Годовую продукцию рассчитывали по общепринятой методике И.М. Распопова [20], запасы водной растительности определяли путем вычисления продукции на площадь зарастания. Объемы накопления в биомассе определяли как произведение средней для водохранилища концентрации элемента в конкретном виде растения на запасы надземной фитомассы в каждом заливе. Расчеты проводили в программе Microsoft Office Excel 2003.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растительный покров некоторых заливов Иваньковского водохранилища

В момент проведения натуральных наблюдений авторами были зарегистрированы 40 видов растений зоны обводнения. В соответствии с методическими рекомендациями [8] и правилом В.Г. Папченкова [15], авторы включали в флористический список изучаемого водного объекта только те виды, которые в момент обследования исследователь видит растущими на покрытом водой грунте. Авторы использовали эколого-фитоценологическую классификацию водной растительности В.М. Катанской [8], которая разделяет тип – водная травянистая растительность – на два класса формаций: настоящая водная растительность (гидрофиты) и воздушно-водная растительность (гелофиты). Настоящая водная растительность включает группу гидрофитов, свободно плавающих в толще воды; гидрофитов, погруженных укореняющихся; гидрофитов с плавающими на поверхности воды листьями растений.

Наиболее массовыми видами, являющимися доминантами в растительных сообществах исследованных заливов, в момент наблюдения были *Equisetum fluviatile* L., *Carex acuta* L., *Scirpus lacustris* (L.) Palla, *Glyceria maxima* Holmb., *Phragmites australis* Trin., *Typha angustifolia* L.,

Potamogeton natans L., *Potamogeton lucens* L., *Potamogeton perfoliatus* L., *Stuckenia pectinata* (L.) Börner, *Myriophyllum spicatum* L., *Polygonum amphibium* L., *Stratiotes aloides* L., в последние два десятилетия значительного развития достигла *Zizania latifolia* Turcz., интродуцированная в водохранилище в середине XX в. Это хорошо согласуется с данными В.Г. Папченкова [17], который описал такие же виды-доминанты, занимающие наибольшие площади, для Иваньковского водохранилища в целом. Приводим краткую классификационную схему растительности рассматриваемых заливов.

Тип растительности. Водная растительность – *Aquiphytosa*.

I. Класс формаций – настоящая водная (гидрофитная) растительность – *Aquiphytosa genuina*.

1. Группа формаций гидрофитов, свободно плавающих в толще воды – *Aquiphytosa genuina demersa natans*:

1) формация роголистника темно-зеленого – *Ceratophylleta demersi*:

– асс. роголистника темно-зеленого *Ceratophylletum demersi*.

2. Группа формаций погруженных укореняющихся гидрофитов – *Aquiherbosa genuina submersa radicans*:

1) формация рдеста блестящего – *Potameta lucentis*:

– асс. *Potametum lucentis*;

2) формация рдеста пронзеннолистного – *Potameta perfoliati* – асс. *Potametum perfoliate*;

3) формация рдеста гребенчатого – *Stuckenieta pectinata* – асс. *Stuckenieta pectinata*:

– асс. *Potameto perfoliati-Stuckenietum pectinata*;

4) формация урути колосистой – *Myriophylleta spicati*:

– асс. *Myriophylletum spicati*;

– асс. *Myriophylletum verticillato-spicati*.

3. Группа формаций укореняющихся гидрофитов с плавающими на поверхности воды листьями – *Aquiherbosa genuina radicans foliis natantibus*:

1) формация рдеста плавающего – *Potameta natantis*:

- асс. *Potametum natantis*;
- 2) формация горца земноводного – *Persicarieta amphibii*:
 - асс. *Persicarietum amphibii*;
- 3) формация кубышки желтой – *Nupharetum luteae*:
 - асс. *Nupharetum luteae*;
 - асс. *Lemna-Nupharetum luteae*;
 - асс. *Equiseteto-Nupharetum luteae*;
 - асс. *Potameteto perfoliati – Nupharetum luteae*;
- 4) формация кувшинки чисто-белой – *Nymphaeeta candidae*:
 - асс. *Nymphaeetum candidae*;
 - асс. *Nuphareto-Nymphaeetum candidae*;
- 5) формация телореза алоэвидного – *Stratioteta aloidis*:
 - асс. *Stratiotetum aloidis*;
 - асс. *Hydrocharieto-Stratiotetum aloidis*;
 - асс. *Lemneto minoris-Stratiotetum aloidis*.

II. Класс формаций – воздушно-водная (гелофитная) растительность – *Aquiherbosa helophyta*.

1. Группа формаций низкотравных гелофитов (разнотравье) – *Aquiherbosa helophyta humilis mixtum*:

- 1) группа простых ассоциаций, построенных одним видом:
 - асс. *Equisetetum fluviatilis*;
 - асс. *Menyanthetum trifoliatae*;
 - асс. *Butometum umbellate*;
 - асс. *Sagittarietum sagittifoliae*.

2. Группа формаций высокотравных гелофитов – *Aquiherbosa helophyta procera*:

- 1) формация тростника обыкновенного – *Phragmiteta australis*:
 - асс. *Phragmitetum australis*;
 - асс. *Typheto-Phragmitetum australis*;
- 2) формация рогоза узколистного – *Typheta angustifoliae*:
 - асс. *Typhetum angustifoliae*;
- 3) формация рогоза широколистного – *Typheta latifoliae*:
 - асс. *Typhetum latifoliae*;
 - асс. *Glycerieto-Typhetum latifoliae*;
 - асс. *Equiseteto-Typhetum latifoliae*;
 - асс. *Phragmiteto-Typhetum latifoliae*;
- 4) формация манника большого – *Glycerieta maximae*:

- асс. *Glycerietum maximae*;
- асс. *Phragmiteto-Glycerietum maximae*;
- асс. *Typheto latifolia-Glycerietum maximae*;
- асс. *Equiseteto-Glycerietum maximae*;
- 5) формация цицании широколистной – *Zizanieta latifoliae*:
 - асс. *Zizanietum latifoliae*;
- 6) формации камыша озерного – *Scirpeta lacustris*:
 - асс. *Scirpetum lacustris*.

Характер зарастания исследованных заливов
Иваньковского водохранилища

Зарастание указанных заливов происходит по типичной схеме. В устьевых участках, испытывающих воздействие ветровых волн, вдоль берегов полоса 5–10-метровой ширины представлена воздушно-водной растительностью (тростник обыкновенный, рогоз узколистный, цицания широколистная) и отдельными куртинами камыша озерного. В верховьях заливов – местах затишных, мало подверженных волно-прибойному воздействию, и при наличии органических грунтов – также мощное развитие имеют воздушно-водные виды (манник большой, хвощ приречный, вахта трехлистная) и на их основе – сплавины (рогозово-манниковые, хвощево-манниковые, вахтовые и др.), достигающие в ширину нескольких десятков метров. Огромные массивы телореза алоэвидного чередуются с группировками погруженной растительности и растений с плавающими листьями (рдесты блестящий и стеблеобъемлющий, уруть колосистая и мутовчатая, роголистник темно-зеленый, кувшинка чисто-белая, кубышка желтая) и занимают всю центральную часть, разрастаясь от края сплавин.

В соответствии с поставленными задачами был проведен анализ результатов собственных исследований состояния высшей водной растительности Иваньковского водохранилища в 1990 и 2005 гг., а также выполнено сравнение полученных результатов с данными других авторов за 1977 г. (табл. 1). В период с 1977 по 1990 г. произошло уплотнение растительных ассоциаций за счет еще большего доминирования ВВР из группы воздушно-водных растений, сопровождающееся увеличением их годо-

Таблица 1. Сравнительная характеристика годовой продукции экологических групп водной растительности Иваньковского водохранилища в 1977, 1990 и 2005 гг. (прочерк — нет данных)

Эколого-биологические группы растений	Годовая продукция, тыс. т в год					
	[5]		данные авторов настоящей статьи			
	1977 г.		1990 г.		2005 г.	
	сырой вес	возд.-сухой вес	сырой вес	возд.-сухой вес	сырой вес	возд.-сухой вес
<i>Aquiherbosa helophyta</i>	112.6	33.3	208.7	45.5	193.4	45.3
<i>Aquiphytosa genuina demersa natans</i> + <i>Aquiherbosa genuina radicans foliis natantibus</i>	52.0	4.05	64.0	6.3	63.8	7.5
<i>Aquiherbosa genuine submersa radicans</i>	19.4	2.35	4.97	0.5	3.85	0.5
<i>Splaviny complexus</i>	—	—	—	—	44.6	9.5
Всего	184.0	39.7	277.7	52.3	305.7	62.8

вой продукции, одновременно со снижением годовой продукции погруженных укореняющихся видов. Анализ данных многолетней динамики годовой продукции в период с 1977 по 1990 г. показал, что величина годовой продукции воздушно-водной растительности выросла с 33.3 до 45.5 тыс. т. в год на возд.-сух. массу (с 112.6 до 208.7 на сырую); продукция видов из группы укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями увеличилась с 4.05 до 6.3 тыс. т. в год (с 52 до 64 в сырой массе); в то время как годовая продукция погруженных укореняющихся гидрофитов снизилась с 2.35 до 0.5 тыс. т в год в возд.-сух. массе (с 19.4 до 4.97 на сырую массу). Совокупно по всем видам годовая продукция высшей водной растительности выросла на 32% — с 39.7 до 52.3 тыс. т в год на возд.-сух. массу (на 51% с 184 до 277.7 в сырой массе). Таким образом, результаты настоящих исследований показали, что в момент проведения исследования сохранялась тенденция, отмеченная ранее [15, 23, 29]. Изменения наблюдаются в распределении растительности в пределах зоны зарастания и в смене видов эдификаторов — ведущая роль в образовании зон зарастания перешла к воздушно-водным (гелофитным) видам.

В период с 1990 по 2005 г. продуктивность всех эколого-биологических групп растений осталась на прежнем уровне, т. е. в этот период произошла стабилизация процесса зарастания. Рост общей годовой продукции к 2005 г. на 10% в сыром весе произошел за счет образования сплавин (табл. 1), продукция которых в предыдущие годы не учитывалась. В 1977 и 1990 гг. не было

данных о величине годовой продукции сплавин. Таким образом, за период с 1977 по 2005 г. произошло увеличение совокупной годовой продукции макрофитов Иваньковского водохранилища на 41.8% в сырой (на 34% в возд.-сух.) массе за счет увеличения продукции двух экологических групп — водно-болотных (гелофитов) и гидрофитов свободно плавающих и укореняющихся. Это сопровождалось сменой видов-эдификаторов и сохранением ведущей роли высокотравных гелофитов в образовании зон зарастания. Для растений из группы погруженных укореняющихся гидрофитов совокупная годовая продукция, напротив, снизилась на 78% в возд.-сух. весе. Полученные результаты хорошо согласуются с данными В.Г. Папченкова [17]. Такая динамика и характер зарастания Иваньковского водохранилища, по-видимому, типичны для старого руслового водохранилища с озеровидными расширениями в средней полосе России в условиях стабильного гидрорежима.

Особо следует отметить такие образования, как сплавины, состоящие из переплетающихся стеблей болотных растений и поросшие видами *Carex*, *Menyanthes trifoliata*, *Eriophorum vaginatum*, *Comarum palustre*. Результаты настоящих натурных наблюдений свидетельствуют об активно идущем процессе заболачивания мелководий с переходом заросших участков в заболоченный берег. Ранее в работе В.Г. Папченкова [15] при сравнении картосхем 1957 и 1998 гг. было показано, что площадь акватории крупных заливов Нижневолжского плеса уменьшилась на 382.5 га за счет преобразования сплавинных комплексов в берег.

Таблица 2. Фитомасса и продукция ВВР Иваньковского водохранилища в 2005 г.

Основные формации	Фитомасса, кг/м ²		Продукция водной растительности, кг/м ² в год	
	сырой вес	возд.-сухой вес	сырой вес	возд.-сухой вес
Группа формаций высокотравных гелофитов				
<i>Phragmiteta australis</i>	1.333	0.384	1.600	0.461
<i>Typheta angustifoliae</i>	2.499	0.714	2.999	0.857
<i>Glycerieta maximae</i>	3.246	0.489	3.895	1.091
<i>Zizanieta latifoliae</i>	4.190	1.155	5.028	1.386
<i>Scirpeta lacustris</i>	1.610	0.425	1.932	0.510
Группа формаций укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями				
<i>Nymphaeeta candidae</i>	1.960	0.585	2.352	0.702
<i>Stratioteta aloidis</i>	8.267	0.769	9.920	0.923
Группа формаций погруженных укореняющихся гидрофитов				
<i>Myriophylleta spicati</i> + <i>Myriophylleta verticillati</i>	3.000	0.270	3.600	0.324
<i>Potameta perfoliati</i>	0.559	0.106	0.671	0.127
<i>Potameta lucentis</i>	1.977	0.282	2.372	0.338
Группа формаций низкотравных гелофитов (разнотравье)*				
<i>Equiseteta fluviatilis</i> , <i>Menyantheta trifoliatae</i> , <i>Butometa umbellate</i> , <i>Sagittarieta sagittifoliae</i> et al.	2.787	0.544	3.344	0.653

* Для низкотравных гелофитов определяли общий вес растений с единицы площади, входящих в укос, так как указанное сообщество характеризуется разнообразным, но непостоянным видовым составом.

Наряду с оценкой годовой продукции ВВР изучался вопрос продуктивности основных растительных сообществ (табл. 2). В комплексах сильного зарастания отмечены высокие показатели продукции, достигающие для высокотравных гелофитов 1.60–5.03 кг/м² сырой (0.46–1.40 кг/м² воздушно-сухой) массы в год; для гидрофитов соответственно 0.67–9.92 кг/м² и 0.13–0.92 кг/м² в год. Максимальные показатели фитомассы, достигающие в сыром весе 9.92 кг/м² (0.92 кг/м² в воздушно-сухом), зафиксированы для формации *Stratioteta aloidis*. Средняя продуктивность, по полученным результатам (табл. 2), составляла для Иваньковского водохранилища 0.67 кг/м² в год, что ниже значений, приведенных в монографии К.К. Эдельштейна [27] для Иваньковского водохранилища (0.88 кг/м²); близко к его оценкам для Углического (0.65 кг/м²) и Волгоградского (0.71 г/м²) и выше значений для Горьковского водохранилища (0.54 кг/м²). Падение средней продуктивности в Иваньковском водохранилище в 2005 г. можно объяснить снижением вклада высокопродуктивных зарослей формаций высокотравных гелофитов (манника, рогоза, камыша, тростника) в общий баланс по сравнению с 1990 г. (табл. 1).

С учетом площадей, занимаемых основными формациями водных растений (табл. 3), были определены запасы растительной массы в исследуемых заливах (табл. 4). При этом продукция рассчитывалась из усредненных показателей фитомассы с 1 м² в сыром весе. На долю высокотравных гелофитов в общих запасах наземной фитомассы в Новосельском заливе приходится 54%, в Федоровском – 59.6, в Коровинском – 53.7. Группа погруженных в воду растений составляет 33, 31 и 34% соответственно. На рис. 2 показаны различия в структуре запасов наземной фитомассы трех заливов. Для Новосельского и Федоровского заливов воздушно-водные гелофиты и свободно плавающие и укореняющиеся с плавающими листьями виды вносят основной вклад в запасы наземной фитомассы при весьма скромном вкладе погруженных видов водной растительности. В Коровинском заливе существенно возрастает доля погруженных укореняющихся видов гидрофитов. Такие отличия в структуре наземной фитомассы Коровинского залива связаны с морфометрическими характеристиками залива, который наиболее глубоководный из трех исследованных, что создает благоприятные усло-

Таблица 3. Площади и степень зарастания заливов Иваньковского водохранилища в 2005 г. (прочерк – вид не обнаружен)

Основные формации	Новосельский залив		Федоровский залив		Коровинский залив	
	га	%	га	%	га	%
Группа формаций высокотравных гелофитов						
<i>Phragmiteta australis</i>	6.0	5.0	9.1	5.8	18.0	7.3
<i>Typheta angustifoliae</i>	23.0	19.2	21.3	13.5	39.0	15.9
<i>Glycerieta maximae</i>	28.0	23.3	49.7	31.6	15.0	6.1
<i>Zizanieta latifoliae</i>	7.0	5.9	10.0	6.3	26.0	10.6
<i>Scirpeta lacustris</i>	-	-	6.3	4.0	-	-
всего группа	64	53.4	96.4	61.2	98	39.9
Группа формаций укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями						
<i>Nymphaeeta candidae</i>	1.8	1.5	8.2	5.2	21.0	8.5
<i>Stratieteta aloidis</i>	28.0	23.3	31.5	20.0	25.0	10.2
всего группа	29.8	24.8	39.7	25,2	46.0	18.7
Группа формаций погруженных укореняющихся гидрофитов						
<i>Myriophylleta spicati</i> + <i>Myriophylleta verticillati</i>	6.0	5.0	3.2	2.0	4.0	1.6
<i>Potameta perfoliati</i>	0.4	0.3	2.2	1.4	34.0	13.8
<i>Potameta lucentis</i>	1.8	1.5	-	-	33.0	13.4
всего группа	8.2	6.8	5.4	3.4	71	28.8
Группа формаций низкотравных гелофитов (разнотравье*)						
<i>Equiseteta fluviatilis</i> , <i>Menyantheta trifoliatae</i> , <i>Butometa umbellata</i> , <i>Sagittarieta sagittifoliae et all.</i>	18.0	15.0	16.0	10.2	30.7	12.6
общая площадь зарослей	120.0		157.5		245.7	100
степень зарастания акватории залива		60		45		32

* Для низкотравных гелофитов определяли общую площадь зарастания, так как указанное сообщество характеризуется разнообразным, но непостоянным видовым составом.

вия для зарастания погруженными укореняющимися гидрофитами.

По полученным данным, в 2005 г. площади зарастания Новосельского, Федоровского и Коровинского заливов составляли 60, 45 и 32% соответственно (табл. 3). Этот показатель существенно выше оптимального уровня зарастания Иваньковского водохранилища, необходимого для сохранения его гидробиологического и гидрохимического режима.

Таким образом, сообщества ВВР трех исследованных заливов имеют высокую продуктивность, следовательно – играют определяющую роль в биогеохимических циклах химических элементов в экосистеме Иваньковского водохранилища. По результатам настоящих исследований (табл. 4), самые высокие величины запасов надземной фитомассы макрофитов получены для Коровинского и Федоровского заливов – 8.5 и 7.33 тыс. т в сыром весе. В Новосельском за-

ливе запасы надземной фитомассы ВВР существенно ниже и составляют 5.91 тыс. т.

Объемы биоаккумуляции микроэлементов высшей водной растительностью

Средние концентрации химических элементов в ВВР Иваньковского водохранилища приведены в табл. 5. Сопоставление полученных содержаний ТМ в водной растительности Иваньковского водохранилища с литературными данными показывает, что концентрации большинства элементов в биомассе ВВР Иваньковского водохранилища заметно выше концентраций в таких же видах Волгоградского водохранилища и Астраханского заповедника и соответствуют уровню содержаний, полученных для растительности Рыбинского и Озернинского водохранилищ (табл. 6), что говорит о невысоком уровне антропогенной нагрузки. Сравнение данных о содержании РЗЭ в рдесте пронзеннолистном из Иваньковского водохранилища с данными

Таблица 4. Запасы надземной фитомассы высшей водной растительности в некоторых заливах Иваньковского водохранилища в 2005 г. (прочерк — вид не обнаружен)

Основные формации	Запасы надземной фитомассы на площади зарастания заливов					
	Новосельский залив		Федоровский залив		Коровинский залив	
	сырой вес, т	возд.-сух. вес, т (% общей биомассы)	сырой вес, т	возд.-сух. вес, т (% общей биомассы)	сырой вес, т	возд.-сух. вес, т (% общей биомассы)
Группа формаций высокотравных гелофитов						
<i>Phragmiteta australis</i>	96.0	27.66 (3.07%)	145.6	41.95 (3.64%)	287.9	82.98 (5.1%)
<i>Typheta angustifoliae</i>	689.8	197.1 (21.88%)	638.8	182.5 (15.8%)	1169.5	334.2 (20.7%)
<i>Glycerieta maximae</i>	1090.7	164.4 (18.25%)	1936.0	291.7 (25.3%)	584.3	88.05 (5.5%)
<i>Zizanieta latifoliae</i>	352.0	97.02 (10.77%)	502.8	138.6 (12.02%)	1307.3	360.4 (22.4%)
<i>Scirpeta lacustris</i>	-	-	121.7	32.13 (2.79%)	-	-
всего группа	2228.5	486.18 (53.98%)	3344.9	686.88 (59.58%)	3349	865.63 (53.7%)
Группа формаций укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями						
<i>Nymphaeeta candidae</i>	42.4	12.64 (1.4%)	192.8	57.56 (4.99%)	493.9	147.4 (9.1%)
<i>Stratioteta aloidis</i>	2777.8	258.4 (28.69%)	3124.9	290.7 (25.22%)	2480.0	230.7 (14.3%)
всего группа	2849.0	271.04 (30.09%)	3317.7	348.26 (30.21%)	2973.9	378.1 (23.5%)
Группа формаций погруженных укореняющихся гидрофитов						
<i>Myriophylleta spicati + Myriophylleta verticillati</i>	216.0	19.44 (2.16%)	115.2	10.37 (0.9%)	144.0	12.96 (0.8%)
<i>Potameta perfoliati</i>	2.69	0.508 (0.06%)	14.8	2.794 (0.24%)	228.1	43.18 (2.7%)
<i>Potameta lucentis</i>	42.7	6.084 (0.68%)	-	-	782.9	111.5 (6.9%)
всего группа	261.39	26.032 (2.89%)	130.0	13.164 (1.14%)	1155.0	167.64 (10.4%)
Группа формаций низкотравных гелофитов (разнотравье*)						
	602.0	117.5 (13.04%)	535.1	104.5 (9.06%)	1026.7	200.5 (12.4%)
Все группы	5912.1	900.75 (100%)	7327.7	1152.8 (100%)	8504.6	1611.87 (100%)

* Для низкотравных гелофитов определяли общий запас растительной массы на площади зарастания, так как указанное сообщество характеризуется разнообразным, но непостоянным видовым составом.

для водного объекта, испытывающего высокую антропогенную нагрузку [4], позволяет сделать вывод о том, что данные, полученные для Иваньковского водохранилища, соответствуют фоновым содержаниям (табл. 7).

Рассчитанные объемы микроэлементов в биомассе ВВР, накопленные в период максимального развития растительности, приведены в табл. 8, 9. Самая большая совокупная масса ТМ накоплена растительностью Коровинского залива (рис. 3) – 2043 кг: из них 1.06 кг V, 0.93 Pb, 4.28 Cr, 0.37 Co, 0.29 Mo, 6.4 Cu, 14.9 Zn, 2.4 Ni, 1011.8 Fe, 81.1 Sr, 919.7 кг Mn. Почти в 1.5 раза меньшее количество ТМ аккумулировано в растительности Федоровского залива – 1449.9 кг. В Новосельском заливе – самые низкие значения биоаккумуляции ТМ ВВР (суммарно 1162.6 кг). Самое высокое значение совокупного объема биоаккумуляции РЗЭ двумя исследуемыми видами (манником большим

и рдестом пронзеннолистным) также получено для Коровинского залива.

По полученным результатам, в Новосельском и Федоровском заливах растения из группы высокотравных гелофитов и гидрофитов с плавающими листьями вносят основной вклад в биоаккумуляцию микроэлементов, поскольку именно они характеризуются более высокими суммарными содержаниями по сравнению с группой погруженных укореняющихся растений (рис. 3). В этих заливах структура растительных сообществ такова, что основной вклад в формирование запасов надземной фитомассы приходится на растения из этих экологических групп, в отличие от Коровинского залива, где значительно возрастает доля погруженных укореняющихся гидрофитов в совокупной фитомассе (рис. 2); т. е. процесс зарастания водохранилища, сопровождающийся сменой растительных сообществ и все большим площадным доминированием

Таблица 5. Средние концентрации микроэлементов в ВВР Ивановского водохранилища в 2005 г. (прочерк – нет данных; SE_{хср} – стандартная ошибка среднего)

Вид (n = 7)	Концентрация в воздушно-сухой массе, мг/кг										
	V	Pb	Cr	Co	Mo	Cu	Zn	Ni	Fe	Sr	Mn
Виды высокотравных гелофитов											
<i>Phragmites australis</i>	0.84	0.65	4.73	0.19	1.54	10.5	55	4.3	424	19.4	283
SE _{хср}	0.61	0.12	1.72	0.12	0.45	2.5	14.8	0.9	242	3.6	30
<i>Glyceria maxima</i>	2.6	0.32	8.2	0.37	0.67	13	41	5.6	1419	15.4	333
SE _{хср}	0.7	0.11	3.23	0.12	0.04	2.5	8.4	1.8	433	1.4	53
<i>Typha angustifolia</i>	0.25	0.20	0.3	0.04	0.01	1.9	4	0.07	41	50	504
SE _{хср}	0.11	0.06	0.15	0.02	0.01	0.4	1.2	0.05	19	5.6	46
<i>Scirpus lacustris</i>	0.62	0.6	1.8	0.17	0.5	9	7	1.6	459	12	395
SE _{хср}	0.26	0.1	0.7	0.04	0.1	2.7	2	0.4	67	1.5	54
Виды укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями											
<i>Stratiotes aloides</i>	0.2	0.8	1.8	0.3	0.08	3.8	8.7	1.1	345	103	1878
SE _{хср}	0.1	0.2	0.8	0.13	0.06	1.7	4.4	0.6	60.6	10.5	230
Виды погруженных укореняющихся гидрофитов											
<i>Potamogeton lucens</i>	4.6	4.2	21.5	1.4	0.45	20.8	24.3	8.6	4420	252	1561
SE _{хср}	2.5	2.4	12	0.6	0.1	12.5	20.4	6.2	3050	27	225
<i>Potamogeton perfol.</i>	2.6	1.36	5	1.7	0.35	8.8	7.9	7.1	6000	188	1240
SE _{хср}	1.1	0.6	2.3	0.4	0.1	2.9	5.8	1.8	3059	64	358
<i>Myriophyllum spict.</i>	0.45	1	3	0.95	1.6	14.5	28	1.8	730	111.8	2898
SE _{хср}	0.20	0.5	1.6	0.3	0.5	3.6	12	0.9	302	37	483

Таблица 6. Содержание ТМ в водной растительности Волгоградского, Озернинского, Рыбинского водохранилищ и в дельте р. Волги (в Астраханском заповеднике)

Вид	Концентрация в возд.-сухой массе, мг/кг				
	Pb	Co	Cu	Zn	Ni
<i>Phragmites australis</i>					
Астраханский заповедник [10]	0.2	0.3	1.72	13.27	0.91
<i>Typha angustifolia</i>					
Астраханский заповедник [10]	0.21	0.04	3.85	14.79	0.04
Волгоградское вдхр [26]	-	0.06	0.71	0.52	-
<i>Scirpus lacustris</i>					
Озернинское вдхр [6]	2.5–27.1	-	1.5-7	0.3-51.7	2.4-2.9
Рыбинское вдхр [12]	3.7	2.2	7	78.3	3
<i>Stratiotes aloides</i>					
Озернинское вдхр [6]	2.5–27.1	-	1.5-7	0.3-51.7	2.4-2.9
Рыбинское вдхр [12]	2.9	3.8	2	38.9	2.1
<i>Potamogeton lucens</i>					
Астраханский заповедник [10]	2.29	2.65	7.99	30.67	11.15
Волгоградское вдхр [26]	-	0.07	0.76	0.58	-
<i>Potamogeton perfoliatus</i>					
Озернинское вдхр [6]	0.06–6.4	-	2.4-10.6	0.5-10.4	1.5-2.8
Волгоградское вдхр [26]	-	0.05	0.75	0.58	-
Рыбинское вдхр [12]	2.3–9.6	1.8-4.9	2.3-5.7	13.3-57.4	2-6.8
<i>Myriophyllum spicatum</i>					
Волгоградское вдхр [26]	-	0.06	0.72	0.57	-
Рыбинское вдхр [12]	2.6	2.5	1.2	12.8	1.6

Таблица 7. Средние концентрации РЗЭ в *Glyceria maxima* и *Potamogeton perfoliatus* в Ивановском водохранилище в 2005 г. (1 – *Glyceria maxima*, 2 – *Potamogeton perfoliatus*, SE_{хср} – стандартная ошибка среднего)

Вид (n = 7)	Концентрация в возд.-сухой массе, мкг/кг													
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
1	41.7	98	7	37.3	4	5.4	4.7	7	4.3	6	2	2	2	2.4
SE _{хср}	9.5	20.4	2.0	9.3	1.8	1.3	1.8	0	1	0	0	0	0	0.4
1 [4]	5000	7000	1150	1150	814	200	872	122	642	144	340	56.8	304	54.7
2	866	1953	202	825	150	49	164	15	128	15	63	3	56	3
SE _{хср}	127	289	29.3	115.4	21.4	4.8	21.8	1.5	17.9	2.8	9.3	0.6	8.8	0.6

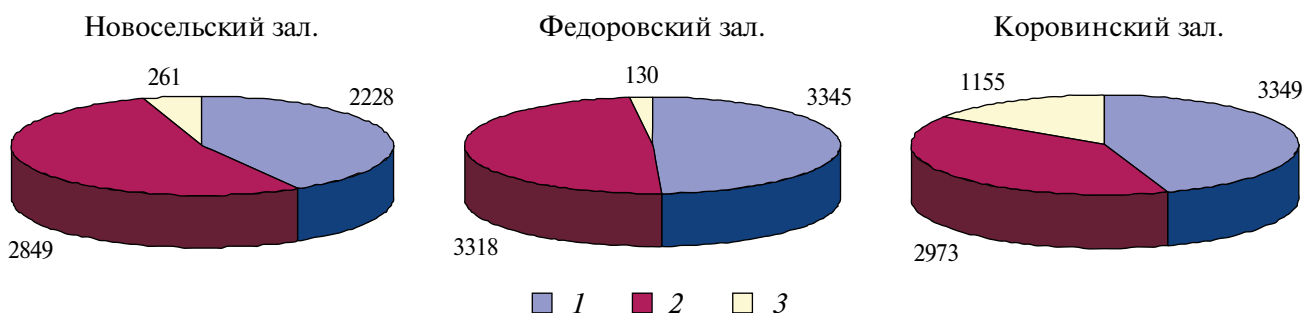


Рис. 2. Вклад отдельных групп водной растительности в запасы сырой фитомассы Новосельского, Федоровского и Коровинского заливов в 2005 г. (г). 1 – группа формаций высокотравных гелофитов, 2 – группа формаций укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями, 3 – группа формаций погруженных укореняющихся гидрофитов.

и увеличением годовой продукции воздушно-водных видов, способствует росту биологической аккумуляции ТМ. В Коровинском заливе ТМ и РЗЭ преимущественно накапливаются погруженными укореняющимися видами. Это объ-

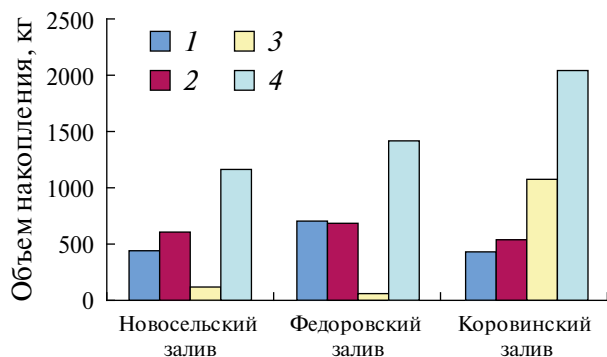


Рис. 3. Объем накопленных ТМ в доминирующих видах ВВП разных экологических групп в заливах Ивановского водохранилища в 2005 г. 1 – высокотравные гелофиты, 2 – укореняющиеся гидрофиты с плавающими листьями, 3 – погруженные укореняющиеся гидрофиты, 4 – сумма.

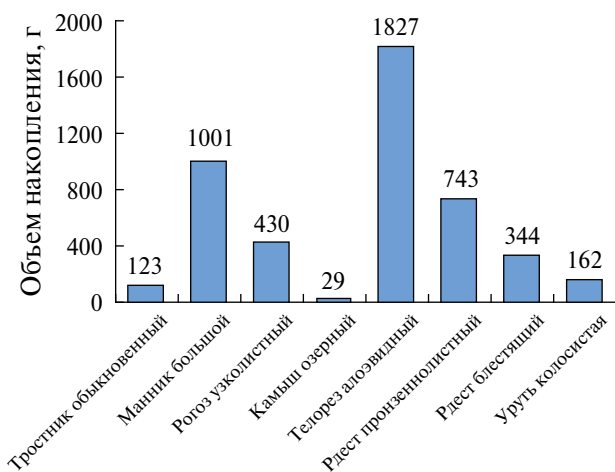


Рис. 4. Сравнительный анализ суммарных объемов биологического накопления ТМ (V, Pb, Cr, Co, Mo, Cu, Zn, Ni, Fe, Sr, Mn) различными видами ВВП в трех заливах Ивановского водохранилища в 2005 г.

ясняется тем, что в Коровинском заливе, в отличие от других заливов, большое распространение имеют формации рдеста пронзеннолистного и рдеста блестящего. В том случае, когда залив за-

Таблица 8. Содержание микроэлементов в суммарной сухой биомассе ВВР заливов Иваньковского водохранилища в 2005 г. (прочерк – вид не обнаружен)

Вид	V	Pb	Cr	Co	Mo	Cu	Zn	Ni	Fe	Sr	Mn
	масса, г								масса, кг		
Новосельский залив											
Виды высокотравных гелофитов											
<i>Phragmites australis</i>	23	18	131	5	43	290	1521	119	11.7	0.5	7.8
<i>Glyceria maxima</i>	427	151	1348	61	110	2137	6740	920	233.3	2.5	54.7
<i>Typha angustifolia</i>	49	39	59	8	2	374	788	14	8.1	9.8	99.3
<i>Scirpus lacustris</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Всего группа	499	208	1538	74	155	2801	9049	1053	253.1	12.9	161.9
Виды укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями											
<i>Stratiotes aloides</i>	52	207	465	78	21	982	2248	284	89.1	26.6	485.3
Виды погруженных укореняющихся гидрофитов											
<i>Potamogeton lucens</i>	28	26	131	9	3	126	148	52	26.9	1.5	9.5
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	1	1	3	1	0,2	5	4	4	3.0	0.09	0.63
<i>Myriophyllum spicatum</i>	9	19	58	19	31	282	544	35	14.2	2.2	56.3
Всего группа	38	46	192	29	34,2	413	696	91	44.1	3.8	66.5
Все виды залива	589	461	2195	181	210,2	4196	11993	1428	386.4	43.3	713.6
Федоровский залив											
Виды высокотравных гелофитов											
<i>Phragmites australis</i>	35	27	198	8	65	440	2307	180	17.8	0.8	11.9
<i>Glyceria maxima</i>	758	268	2392	108	195	3792	11960	1633	413.9	4.5	97.1
<i>Typha angustifolia</i>	46	37	55	7	2	347	730	13	7.5	9.1	92
<i>Scirpus lacustris</i>	20	19	58	6	16	289	225	51	14.7	0.38	12.7
Всего группа	859	351	2703	129	278	4868	15222	1877	453.9	14.8	213.7
Виды укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями											
<i>Stratiotes aloides</i>	58	232	523	87.2	23.2	1105	2529	320	100.3	29.9	545.9
Виды погруженных укореняющихся гидрофитов											
<i>Potamogeton lucens</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	7	4	14	5	1	25	22	20	16.8	0.5	3.5
<i>Myriophyllum spicatum</i>	5	10	31	10	17	150	290	19	7.6	1.2	30.0
Всего группа	12	14	45	15	18	175	312	39	24.3	1.7	33.5
Все виды залива	929	597	3271	231.2	319.2	6148	18063	2236	578.6	46.4	793.1
Коровинский залив											
Виды высокотравных гелофитов											
<i>Phragmites australis</i>	70	54	392	16	128	871	4564	356	35.2	1.6	23.5
<i>Glyceria maxima</i>	229	81	722	33	59	1144	3610	493	124.9	1.3	29.3
<i>Typha angustifolia</i>	84	67	100	13	3	635	1337	23	13.7	16.7	168.4
<i>Scirpus lacustris</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Всего группа	383	202	1214	62	190	2650	9511	872	173.8	19.7	221.2
Виды укореняющихся гидрофитов с плавающими на воде листьями											
<i>Stratiotes aloides</i>	46	184	415	69	19	877	2007	279	79.6	23.8	433.2
Виды погруженных укореняющихся гидрофитов											
<i>Potamogeton lucens</i>	513	468	2397	156	50	2319	2709	959	492.8	28.1	174.0
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	112	59	216	73	15	380	341	306	256.1	8.2	53.5
<i>Myriophyllum spicatum</i>	6	13	39	12	21	188	363	23	9.5	1.4	37.6
Всего группа	631	540	2652	241	86	2887	3413	1288	758.4	37.7	265.1
Все виды залива	1060	926	4281	372	295	6414	14931	2439	1011.8	81.1	919.6

Таблица 9. Содержание РЗЭ в сухой биомассе *Glyceria maxima* и *Potamogeton perfoliatus* в заливах Ивановского водохранилища в 2005 г.

Элемент	Масса, г								
	Новосельский залив			Федоровский залив			Коровинский залив		
	<i>Glyceria maxima</i>	<i>Potamog. perfoliatus</i>	сумма	<i>Glyceria maxima</i>	<i>Potamog. perfoliatus</i>	сумма	<i>Glyceria maxima</i>	<i>Potamog. perfoliatus</i>	сумма
La	6.86	0.44	7.30	12.17	2.42	14.59	3.67	37.41	41.08
Ce	16.11	0.99	17.10	28.59	5.46	34.05	8.63	84.33	92.96
Pr	1.15	0.10	1.25	2.04	0.56	2.60	0.62	8.74	9.36
Nd	6.13	0.42	6.55	10.88	2.3	13.18	3.28	35.62	38.9
Sm	0.66	0.08	0.74	1.17	0.42	1.59	0.35	6.48	6.83
Eu	0.89	0.03	0.92	1.58	0.14	1.72	0.48	2.11	2.59
Gd	0.78	0.08	0.86	1.38	0.46	1.84	0.42	7.10	7.52
Tb	1.15	0.01	1.16	2.04	0.04	2.08	0.62	0.63	1.25
Dy	0.70	0.07	0.77	1.25	0.36	1.61	0.38	5.54	5.92
Ho	0.99	0.01	1.00	1.75	0.04	1.79	0.53	0.65	1.18
Er	0.33	0.03	0.36	0.58	0.18	0.76	0.18	2.74	2.92
Tm	0.33	0.001	0.33	0.58	0.007	0.59	0.18	0.11	0.29
Yb	0.33	0.03	0.36	0.58	0.155	0.74	0.18	2.40	2.58
Lu	0.40	0.001	0.40	0.71	0.008	0.72	0.21	0.12	0.33
Всего	36.81	2.29	39.1	65.3	12.55	77.9	19.73	194.0	213.7

селяется формациями рдестов, главенствующая роль в биоаккумуляции исследуемых элементов переходит к погруженным укореняющимся гидрофитам, которые механически задерживают взвесь, с которой сорбционно связаны химические элементы. Отличия аккумулирующей способности различных групп макрофитов обусловлены различными механизмами детоксикации ТМ в организмах растений, которые определяются либо преимущественным связыванием металлов клеточными стенками корней (воздушно-водные растения), либо комплексообразованием ионов металлов при участии различных соединений, синтезируемых в клетках листа (погруженные укореняющиеся растения) [18, 25, 31, 34]. Большую роль в извлечении химических элементов из взвешенного вещества, изменении их форм нахождения и повышении биодоступности металлов играют водорослевые и бактериальные эпифитные сообщества на поверхностях стеблей и листьев макрофитов. В литературе приводятся различные механизмы поступления химических элементов из осажденной на поверхности водных растений взвеси в клетки. Например, известно, что металлы способны проникать через устьица, а коллоидные мицеллы гидроксида трехвалентного железа и адсорбционно связанные с ними металлы способны эффективно по-

глощаться клетками водных растений. Процессы образования слизистой пленки, выделения клеточной органики, гуттации других экзаметаболитов также приводят к переходу соединений химических элементов из взвеси в биодоступные для растений формы [30].

Ниже приведены ряды убывания накопления химических элементов в биомассе макрофитов, которые позволяют выявить особенности накопления различными экологическими группами. В общем виде ряд аккумуляции микроэлементов в группе воздушно-водных растений выглядит следующим образом: Fe > Mn > Sr(Zn) >> Cu > Cr > Ni > V > Pb > Mo > Co. Для группы погруженных укореняющихся растений Новосельского и Федоровского заливов ряд аккумуляции имеет вид: Mn > Fe > Sr > Cu(Zn) > Cr > Ni >> Pb > Co > V > Mo; для Коровинского залива: Fe >> Mn > Sr > Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > V > Co > Mo.

Таким образом, установлено, что значительные объемы ТМ связываются ВВР исследованных заливов Ивановского водохранилища. Приведенные данные могут использоваться при планировании рекультивационных и фиторемедиационных мероприятий для оценки объемов загрязняющих веществ, которые будут выведены из биологиче-

ского круговорота и миграционных процессов в экосистеме водохранилища при удалении ВВР.

Главные виды-аккумуляторы в Ивановском водохранилище — телорез алоэвидный, манник большой, рдест блестящий. Эти виды внутри своих экологических групп являются лидерами по объемам накопления химических элементов в растительной биомассе (табл. 8, 9; рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованные заливы приплотинной части Ивановского водохранилища (Новосельский, Федоровский, Коровинский) характеризуются высокой степенью зарастания. Площади, покрытые водной растительностью, составляют 60 (120 га), 45 (157.5 га) и 32% (245.7 га) соответственно.

Установлено, что в исследуемый период (с 1977 по 2005 г.) произошло значительное увеличение совокупной продуктивности трех экологических групп макрофитов Ивановского водохранилища — воздушно-водной гелофитной растительности; гидрофитов, свободно плавающих в толще воды и укореняющихся гидрофитов с плавающими на поверхности воды листьями. При этом произошли смена видов-эдификаторов и возрастание ведущей роли воздушно-водных видов в образовании зон зарастания. Исключения составляют растения из группы укореняющихся гидрофитов с плавающими на поверхности воды листьями, для которых, напротив, произошло значительное снижение совокупной годовой продукции на 79%. В период с 1990 по 2005 г. продуктивность всех эколого-биологических групп растительности сохранялась на одном уровне, что говорит о стабилизации процесса зарастания в этот период.

Наблюдается большое сходство в структуре растительных сообществ Федоровского и Новосельского заливов. В этих заливах основной вклад в формирование запасов надземной фитомассы вносят высокотоксичные гелофиты и укореняющиеся гидрофиты с плавающими листьями при незначительном вкладе погруженных, укореняющихся гидрофитов. Иная структура растительных сообществ в Коровинском зали-

ве, где благодаря его глубоководности создаются благоприятные условия для зарастания погруженными укореняющимися гидрофитами. В этом заливе запасы фитомассы погруженных укореняющихся видов существенно выше и самая большая площадь зарастания видами этих экологических групп — 117 га, в то время как в Новосельском и Федоровском заливах площади составляют 38 га и 45.1 га соответственно.

Дана количественная оценка процессов биологического связывания химических элементов и определены объемы ТМ (V, Pb, Cr, Co, Mo, Cu, Zn, Ni, Fe, Sr, Mn, Fe, Mn, Sr) и РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu), ежегодно вовлекаемые в биологический круговорот в заливах. Суммарно в Новосельском, Федоровском и Коровинском заливах водной растительностью в период максимального развития растительности (июль—август) накапливается 4657.8 кг ТМ: из них 2.58 V, 1.98 Pb, 9.7 Cr, 0.78 Co, 0.82 Mo, 16.8 Cu, 45 Zn, 6.1 Ni, 1977 Fe, 171 Sr, 2426 кг Mn. Формации манника большого и рдеста пронзеннолистного накапливают совокупно в трех заливах 0.33 кг РЗЭ. Самая большая совокупная масса ТМ и РЗЭ накоплена растительностью Коровинского и Федоровского заливов. В трех исследованных заливах главными видами-аккумуляторами являются манник большой, телорез алоэвидный и рдест блестящий. Они характеризуются высокими значениями годовой продукции, все больше доминируют в сообществах водной растительности заливов и играют положительную роль в связывании ТМ и РЗЭ из поверхностных вод и донных осадков. В том случае, когда заливы зарастают формацией рдестов, как Коровинский залив, ведущая роль в биоаккумуляции ТМ и РЗЭ переходит к этой группе растений.

Приведенные данные дают количественную оценку объема загрязняющих веществ, которые могут быть выведены из миграционных процессов в Ивановском водохранилище при проведении рекультивационных и фиторемедиационных мероприятий. Удаление макрофитов в конце вегетационного периода позволит извлечь значительные количества ТМ и РЗЭ, накопленные растительностью, а также предотвратить вторичное загрязнение придонных вод и донных осадков при их отмирании и разложении. Однако дальнейшее

восстановление водных растительных сообществ и достижение ими высокой продуктивности займет много лет, в течение которых экосистема водохранилища останется без естественных природных фильтров, какими являются заросли водных и прибрежно-водных растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баренбойм Г.М., Авандеева О.П.* Редкоземельные элементы в водных объектах (экологические аспекты) // Вода: химия и экология. 2014. № 5 (71). С. 42–55.
2. *Гришанцева Е.С., Бычков А.Ю., Шурупова С.А., Федорова Л.П.* Биогеохимические особенности накопления редкоземельных элементов макрофитами Ивановского водохранилища // Тр. КарНЦ РАН. Сер. Лимнология. 2017. № 3. С. 55–64. DOI: 10.17076/lim539
3. *Гришанцева Е.С., Сафронова Н.С., Кирпичникова Н.В., Федорова Л.П.* Распределение микроэлементов в высшей водной растительности Ивановского водохранилища // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2010. № 3. С. 223–231.
4. *Елизарова И.Р., Бернадская Д.С., Денисов Д.Б., Разумовская А.В.* Биогеохимическая миграция и аккумуляция химических элементов растениями в аквасистеме сбросного канала Кольской АЭС // Геохимия. 2022. Т. 67. № 2. С. 191–202.
5. *Ефимова Т.А., Никаноров Ю.И.* Перспективы вселения растительноядных рыб в Ивановское водохранилище // Вопр. ихтиол. 1977. Т. 17. Вып. 4 (195). С. 715–725.
6. *Жидков М.В.* Накопление тяжелых металлов в высшей водной растительности Озернинского водохранилища // Изв. Самарского НЦ РАН. 2009. Т. 11. № 1 (3). С. 292–294.
7. *Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф.* Зарастающие водотоки и водоемы: Динамические процессы формирования донных отложений. М.: Наука, 2004. 310 с.
8. *Катанская В.М.* Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Л., 1981. 176 с.
9. *Кутова Т.Н., Пидгайко М.Л., Саватеева Е.Б.* Некоторые закономерности гидробиологического режима малых озер в связи с зарастанием // Изв. ГосНИОРХ. 1973. Т. 84. С. 119–127.
10. *Лычагина Н.Ю., Касимов Н.С., Лычагин М.Ю.* Биогеохимия макрофитов дельты Волги // Геоэкология Прикаспия. М.: Геогр.ф-т МГУ, 1998. Вып 4. 83 с.
11. *Минеева Н.М.* Содержание фотосинтетических пигментов в водохранилищах Верхней Волги (2005–2016 гг.) // Биология внутренних вод. 2019. № 2. С. 33–41.
12. *Микрякова Т.Ф.* Накопление тяжелых металлов макрофитами в условиях различного уровня загрязнения водной среды // Вод. ресурсы. 2002. Т. 29. № 2. С. 253–255.
13. *Моисеенко Т.И., Кудрявцева Л.П., Гашкина Н.А.* Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: Технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. 261 с.
14. *Никаноров А.М., Жулидов А.Д.* Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 312 с.
15. *Папченков В.Г.* Картирование растительного покрова водоемов и водотоков // Мат-лы VI Всерос. shk.-конф. по водным макрофитам “Гидробиология 2005”. 2005. С. 135–142.
16. *Папченков В.Г.* Растительный покров Ивановского и Горьковского водохранилищ // Экологические проблемы Верхней Волги. Коллективная монография. Ярославль: Изд. ЯГТУ, 2001. С. 151–155.
17. *Папченков В.Г., Папченкова Г.А.* Динамика и зарастание водохранилищ Волги // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 402–410.
18. *Пасичная Е.А., Арсан О.М., Годлевская О.А.* Газообмен макрофитов при воздействии ионов марганца (II) водной среды // Гидробиол. журн. 2009. Т. 45. № 4. С. 101–115.
19. *Петракова Е.А.* Макрофиты в фиторемедиации и биоиндикации вод. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Брянск: Брянский гос. ун-т, 2017 г. 23 с.
20. *Распопов И.М.* Фитомасса и продукция макрофитов Онежского озера // Микробиология и первичная продукция Онежского озера. Л.: Наука, 1973. С. 123–142.
21. *Садчиков А.П., Кудряшов М.А.* Экология прибрежно-водной растительности (учебное пособие для студентов вузов). М.: НИИ-Природа, РЭФИА, 2004. 220 с.
22. *Титаева Н.А., Сафронова Н.С., Шепелева Е.С., Кирпичникова Н.В., Федорова Л.П.* Эколого-геохимические исследования водных и наземных экосистем района Иваноковского водохранилища р. Волги // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4, Геология. 2004. № 1. С. 42–53.
23. *Тихомиров О.А., Тихомирова Л.К., Кирпичникова Н.В., Федорова Л.П., Сидорова Н.К.* Современное состояние аквальных комплексов заливов Ивановского водохранилища // Экологические аспекты изучения природной среды Тверской об-

- ласти. Тверь: Тверской гос. ун-т, 1997. С. 16–32.
24. Федорова Л.П. Характеристика высшей водной растительности водохранилища // Ивановское водохранилище: Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. С. 210–223.
 25. Феник С.И., Трофняк Т.Б., Блюм Я.Б. Механизм формирования устойчивости растений к тяжелым металлам // Успехи современ. биол. 1995. Т. 115. Вып. 3. С. 261–275.
 26. Фомина А.А., Тихомирова Е.И., Кораблева А.И. Анализ содержания тяжелых металлов в высших водных растениях Волгоградского водохранилища в районе агломерации Саратов-Энгельс // Изв. Самарского НЦ РАН. 2016. Т. 18. №2 (3). С. 822–826.
 27. Эдельштейн К.К. Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
 28. Экзерцев В.А. Флора Ивановского водохранилища // Растительность волжских водохранилищ. М.; Л.: Наука, 1966. С. 104–142.
 29. Экзерцев В.А., Лисицина Л.И., Довбня И.В. Сукцессии гидрофильной растительности в литорали Ивановского водохранилища // Тр. ИБВВ РАН. 1990. Вып. 59 (62). С. 120–132.
 30. Янин Е.П. Эпифитовзвесь – новый индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами. М.: ИМГРЭ, 2002. 51 с.
 31. Clemans S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis // Planta. 2001. V. 212. № 4. P. 475–486.
 32. Lachaux N., Cossu-Leguille C., Poirier L., Gross E.M., Giamberini L. Integrated environmental risk assessment of rare earth elements mixture on aquatic ecosystems // Front. Environ. Sci. 10:974191. doi:10.3389/fenvs.2022.974191
 33. McCutcheon S., Schnoor J. Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants. Environmental Science and Technology: A Wiley-Interscience Series of Texts and Monographs. Hoboken, 2003. 987 p.
 34. Mishra V.K., Tripathi B.D. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the tree aquatic macrophytes // Bioresour. Technol. 2008. V 99 (15). P. 7091–7097.

Bioaccumulation of trace elements by higher aquatic vegetation of some bays in the Ivan'kovo Reservoir

E. S. Grishantseva^a, L. P. Fedorova^b

^aLomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Department of Geochemistry, Moscow, 119234 Russia

^bInstitute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Ivan'kovo Scientific Research Station, Konakovo, Tver Region, 171251 Russia

*e-mail: shes99@mail.ru

The article presents the results of determining the volumes of biological accumulation of microelements (V, Pb, Cr, Co, Mo, Cu, Zn, Ni, Fe, Sr, Mn) in eight species and rare earth elements (REE) (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) in two species of higher aquatic and coastal-aquatic plants of three overgrown bays of the dam part of the Ivan'kovo Reservoir – Novoselsky, Fedorovsky and Korovinsky. The floral composition of the plant communities of the bays has been studied, the phytomasses of the dominant associations of overgrown areas, products and areas occupied by higher aquatic vegetation have been determined. A comparison of the data for 1977 with the data for 2005 showed that there was a significant increase in the total annual production due to the increase in the production of two ecological groups of macrophytes of the Ivan'kovo reservoir – air-water (gelophytes) and hydrophytes of free-floating and rooting with the change of species-edifiers and the increasing leading role of air-water (gelophyte) vegetation species in the formation of overgrowth zones. In the period from 1990 to 2005, the overgrowing process stabilized and the productivity of all ecological and biological vegetation groups remained at the same level. In total, 4657.8 kg of heavy metals accumulate in the dry biomass of macrophytes in Novoselsky, Fedorovsky and Korovinsky bays during the period of maximum development (July–August): 2.58 V, 1.98 Pb, 9.75 Cr, 0.78 Co, 0.82 Mo, 16.76 Cu, 45 Zn, 6.1 Ni, 1977 Fe, 171 Sr, 2426 kg Mn. The dry biomass of *Glyceria maxima* Holmb. and *Potamogeton perfoliatus* L. from three bays contains 0.33 kg of rare earth elements. The largest mass of heavy metals accumulates in the vegetation of the Korovinsky and Fedorovsky bays. In the Korovinsky Bay, where the proportion of submerged rooting species in the total phytomass is significantly increasing, the highest bioaccumulation values of heavy metals and rare earth elements have been obtained. The main accumulator species are the *Stratiotes aloides* L., *Glyceria maxima* Holmb., *Potamogeton lucens* L. It is shown that the process of overgrowing of bays, accompanied by a change in plant communities, an increasing area dominance and an increase in the annual production of airborne and aquatic species, contributes to the growth of biological accumulation of heavy metals.

Keywords: overgrowth, productivity, aquatic vegetation, Ivan'kovo Reservoir, heavy metals, rare earth elements.