

## ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ ВОДОЁМОВ И ВОДОТОКОВ БЕЛАРУСИ

Н. В. Жуковская, Н. В. Ковальчик, Б. П. Власов

Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, пр.  
Независимости 4, 220030 Минск, Республика Беларусь; natazhuk@gmail.com

Накопление тяжёлых металлов (ТМ) высшей водной растительностью определяется рядом факторов, в числе которых элементный состав среды обитания, таксономическая принадлежность растения, экологическая ниша и др. Формирование химического состава вод и донных осадков происходит в результате взаимодействия разнообразных процессов: климатических, гидрологических, механических, физических, химических, биологических и других, протекающих как на водосборе, так и в самом водоёме. Доступность металлов водным растениям зависит от ряда условий: природа иона самого металла и его способность к комплексообразованию; концентрация и характер органических и неорганических лигандов, взвешенных частиц; кислотно-щелочной баланс, окислительно-восстановительный потенциал, температура, минерализация, цветность вод, содержание кислорода.

Целью настоящей работы является оценка степени влияния отдельных факторов на содержание ТМ (Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb) в тканях погружённых макрофитов рек и озёр Беларуси.

Объектами исследования явились отдельные виды высшей водной растительности, произрастающие в водоёмах и водотоках Беларуси и относящиеся к группе полностью погружённых гидрофитов [1]: неукореняющиеся (роголистник подводный *Ceratophyllum submersum* L., роголистник тёмно-зелёный *Ceratophyllum demersum* L., телорез алоэвидный *Stratiotes aloides* L.); укореняющиеся с воздушными генеративными органами (рдесты блестящий *Potamogeton lucens* L., пронзённолистный *Potamogeton perfoliatus* L., волосовидный *Potamogeton trichoides* Cham, et Schlecht., гребенчатый *Potamogeton pectinatus* L., длиннейший *Potamogeton praelongus* Wulf., курчавый *Potamogeton crispus* L., сжатый *Potamogeton compressus* L., узловатый *Potamogeton nodosus* Poir., Фриса *Potamogeton friesii* Rupr., уруть колосистая *Myriophyllum spicatum* L. и мутовчатая *Myriophyllum verticillatum* L., элодея канадская *Elodea canadensis* Michx.). Рассматриваются также харовые водоросли (*Charophyta*), которые часто относят к высшей водной растительности.

Погружённые водные растения накапливают большие количества микроэлементов по сравнению с полупогружёнными и растениями с плавающими листьями [2–5], чем и обусловлен их выбор в качестве объекта исследования.

Пробы растений отбирались на 97 ключевых участках (КУ), расположенных на озёрах (46 КУ), водохранилищах (4 КУ) и реках (47 КУ) Беларуси. Общий объём выборки по погружённым макрофитам составил 387.

Анализ валового содержания элементов выполнялся эмиссионным спектральным методом (ЭСА). Нижний предел обнаружения составляет (мг/кг, на золу): Ti – 1, V – 10, Cr – 5, Mn – 10, Ni – 8, Cu – 1, Zn – 100, Pb – 5. Содержание элементов пересчитывалось на абсолютно сухое вещество. Оценка влияния отдельных факторов на содержание ТМ в тканях погружённых макрофитов осуществлялась с помощью ста-

тистических методов: параметрический и непараметрический корреляционный и дисперсионный анализы.

Концентрации ТМ в тканях погружённых макрофитов варьируют в достаточно широких пределах – как в зависимости от их видовой принадлежности, так и среди растений одного вида (табл. 1, рис. 1).

Особенно высокие показатели накопления и наибольший размах их колебаний в пределах вида установлены для Mn. Повышенной способностью накапливать Mn обладают харовые водоросли, роголистник и телорез. Обращают на себя внимание достаточно высокие концентрации Zn (40 и 23 мг/кг у полушника озёрного и харовых водорослей) и Pb у полушника озёрного (29 мг/кг). В целом, максимальными средними содержаниями V, Mn, Ni и Zr характеризуются харовые водоросли, Ti, Cu, Zn и Pb – полушник озёрный.

Сравнение элементного состава рдестов (как наиболее представительной по объёму выборки) водоёмов и водотоков показало, что последние отличаются более высокими зольностью и средним содержанием всех анализируемых элементов (рис. 1). Различия по концентрации Mn (U-критерий Манна-Уитни = 1779,  $p = 0,003$ ) и Cu (U = 1140,  $p < 0,001$ ) статистически значимы. Различия оценивались для Mn, Cu и Pb как элементов со 100-процентной встречаемостью в тканях рассматриваемых видов растений. Данная закономерность прослеживается и для погружённых макрофитов в целом.

Высшая водная растительность извлекает химические элементы, как из донных отложений, так и водной толщи. Причём макрофиты способны извлекать и накапливать металлы, не только растворённые в воде, но и присутствующие во взвешенно-коллоидном материале водной массы и на поверхности листьев. Корреляционный анализ (рис. 2) позволил установить статистически значимые связи между содержанием в тканях макрофитов озёр и донных отложениях Mn ( $r = +0,26$ ,  $p < 0,001$ ), воде – Zn ( $r = +0,52$ ,  $p < 0,001$ ). Для рек выявлена зависимость накопления Mn погружёнными укореняющимися макрофитами от его концентрации в воде ( $r = +0,44$ ,  $p < 0,001$ ) и донных осадках ( $r = +0,51$ ,  $p < 0,001$ ).

*pH.* Значение pH в озёрных водах изменяется в пределах 4,6–8,9, при среднем значении 7,6. Минимальное значение pH (4,6) отмечается в водах оз. Бредно. Установлено влияние показателя pH на содержание Pb в тканях погружённых макрофитов (связь статистически значима). С уменьшением значения pH увеличивается содержание Pb ( $r = -0,37$ ,  $p < 0,001$ ). Следует отметить, что для подвыборки, ограниченной  $pH < 6,5$  (кислые и слабокислые воды), значение коэффициента корреляции увеличивается до  $-0,6$ . Связи между значением pH в речных водах и содержанием в тканях макрофитов анализируемых металлов не установлено. pH речных вод варьирует в пределах 6,6–8,4.

*Общая минерализация.* Согласно [6], по мере повышения минерализации увеличивается содержание растворённых форм металлов, что обусловлено образованием прочных комплексных соединений с минеральной составляющей вод. Для речных объектов установлена статистически значимая прямая связь между минерализацией воды (мг/дм<sup>3</sup>) и содержанием Mn в тканях погружённых макрофитов ( $r = +0,45$ ,  $p < 0,001$ ; рис. 3). Для водоёмов указанная связь не установлена. Следует отметить, что исследованные озёра и водохранилища по сравнению с реками характеризуются значительно более низкими значениями минерализации вод (рис. 4).

Трофический тип водоёма определяется показателями физико-химической и биологической природы. Влияние трофического статуса озёр на содержание ТМ в

погружённых макрофитах было оценено на примере рдестов (табл. 2). Установлены статистически значимые различия по содержанию Mn в тканях рдестов (Н-критерий Краскела-Уоллиса = 24,9,  $p = 0,009$ ). Наименьшая концентрация Mn отмечается в тканях рдестов мезотрофных с признаками олиготрофии озёр. Указанная зависимость характерна также для других видов растений (рис. 5).

Таблица 1 – Содержание ТМ в высшей водной растительности водоёмов и водотоков Беларуси, мг/кг сухого вещества

Растение, n	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Zr	Pb
Хара, 48	26,3	6,0	3,3	1 373	2,4	8,9	22,7	36,9	6,3
Рдест, 176	3,5	3,3	4,3	184	0,95	1,8	0,95	12,6	1,5
Роголистник, 30	2,6	1,6	1,6	789	2,0	4,2	10,4	3,3	3,6
Уруть, 24	4,4	5,5	4,7	260	0,16	3,0	16,3	3,8	4,4
Элодея, 40	7,3	4,2	2,4	411	0,18	3,0	6,7	13,4	5,2
Телорез, 26	1,9	2,3	0,90	1 007	0,12	0,41	4,0	16,9	0,54
Полушник озёрный, 13	59,3	2,7	2,9	310	0,40	21,9	39,8	6,0	28,8

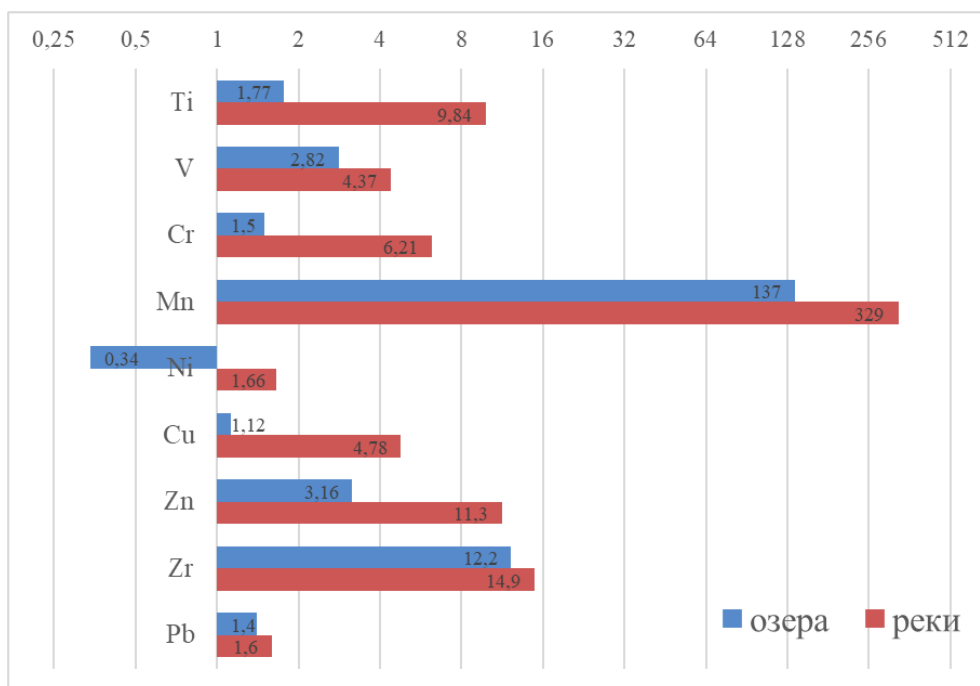


Рисунок 1 – Среднее содержание химических элементов в рдестах (*Potamogeton*) водоёмов и водотоков Беларуси, мг/кг

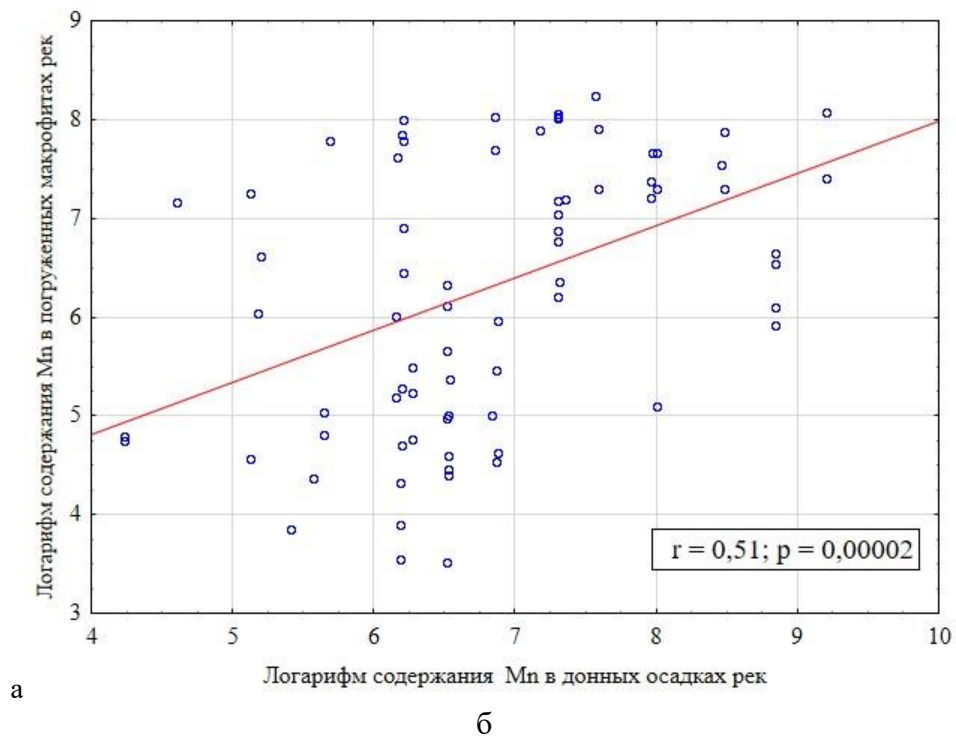
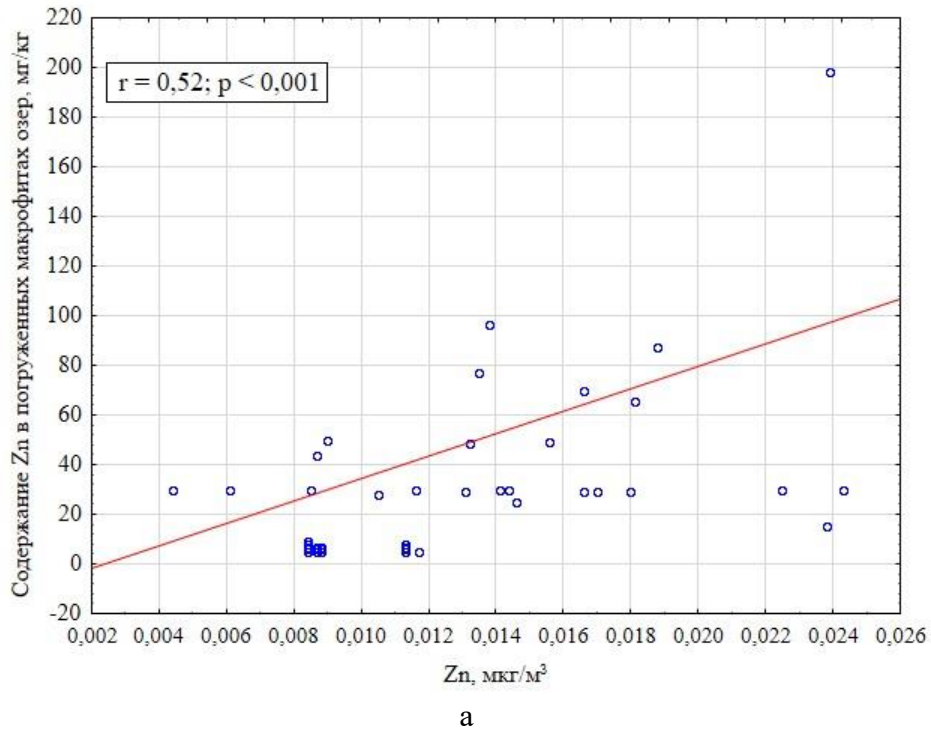


Рисунок 2 – Зависимость накопления Zn в погружённых макрофитах озёр от его содержания в воде (а); Mn в погружённых макрофитах рек от содержания элемента в донных осадках (б)

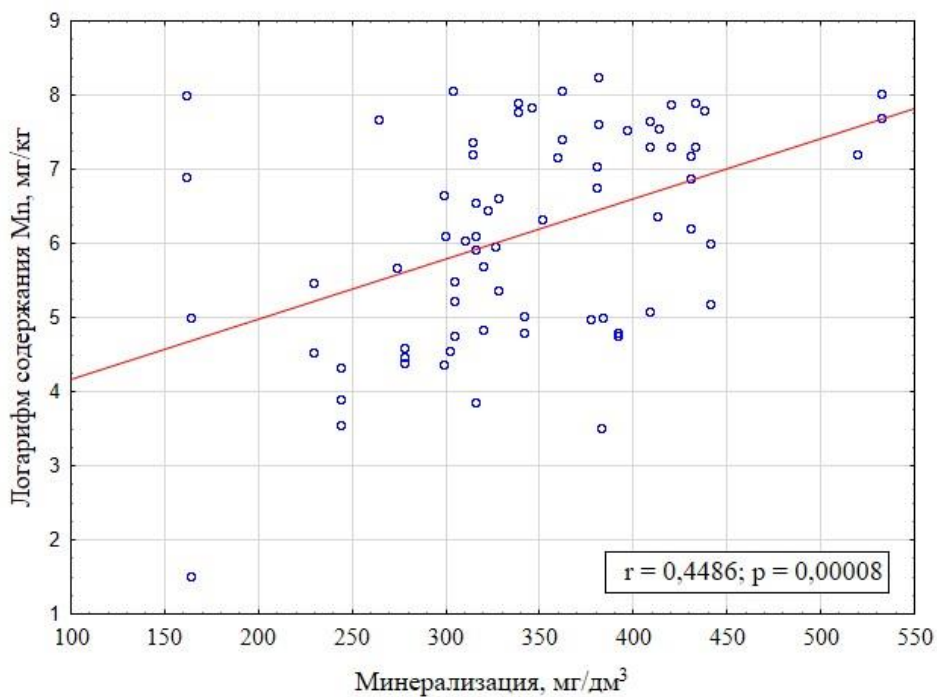


Рисунок 3 – Зависимость содержания Mn в тканях макрофитов от минерализации речных вод

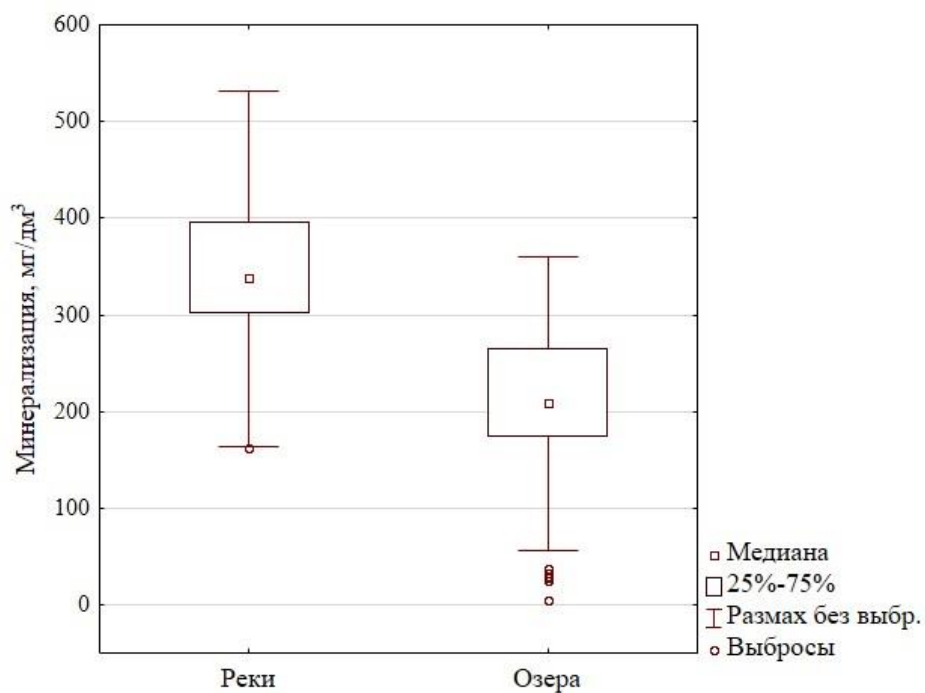


Рисунок 4 – Диаграмма размаха общей минерализации вод рек и озёр, мг/дм<sup>3</sup>

Таблица 2 – Содержание ТМ в рдестах (*Potamogeton*) водоёмов, мг/кг сухого вещества

Трофический статус, n	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Zr	Pb
Мезотрофные с признаками олиготрофии, 24	0,20	2,01	0,37	28,4	0,30	0,91	–	5,30	0,95
Мезотрофные, 28	2,27	6,32	4,34	96,9	0,78	0,84	76,6	10,3	1,23
Эвтрофные, 67	1,85	2,48	1,59	242	0,20	1,37	2,08	6,46	1,70

Уровень концентрации металлов в погружённых макрофитах зависит от большого числа разнообразных факторов. Влияние элементного состава среды роста на содержание металлов в тканях погружённых макрофитов выявлено в отношении Mn. Установлены статистически значимые связи между концентрацией элемента в растениях и его содержанием в донных отложениях озёр, а также донных отложениях и воде водотоков.

Выявлены статистически значимые различия между водоёмами и водотоками по концентрации Mn и Cu в тканях рдестов и погружённых макрофитов в целом.

Установлено влияние показателя pH на содержание Pb в тканях погружённых макрофитов озёр, общей минерализации – Mn в тканях погружённых макрофитов рек.

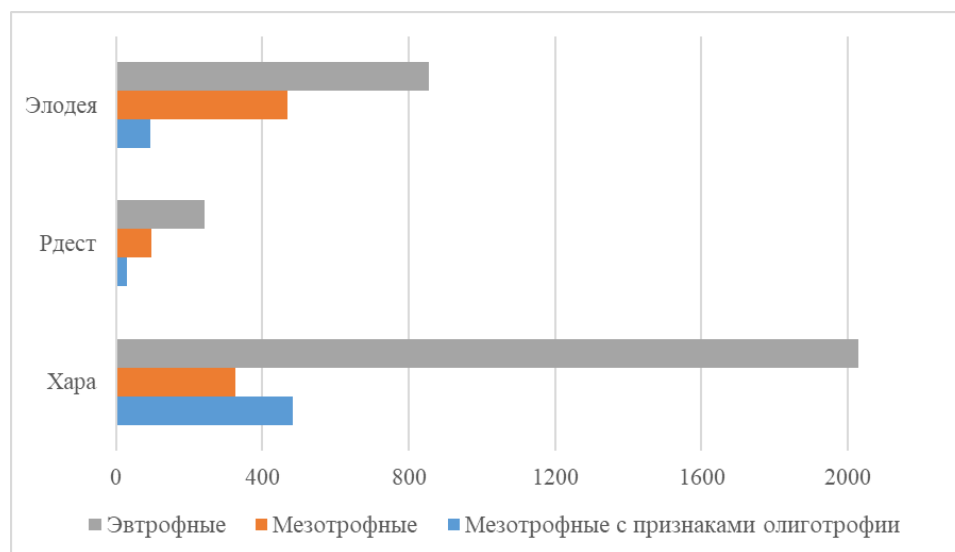


Рисунок 5 – Среднее содержание Mn в водной растительности водоёмов различного трофического статуса, мг/кг

### Библиографические ссылки

1. Гигевич Г. С., Власов Б. П., Вынаев Г. В. Высшие водные растения Беларуси: эколого-биологическая характеристика, использование и охрана. Минск: Издат. центр БГУ. 2001. 231 с.
2. Мониторинг растительного мира в Республике Беларусь: результаты и перспективы. Минск: Беларуская навука, 2019. 491 с.
3. Жуковская Н. В., Власов Б. П., Ковальчик Н. В. Особенности накопления тяжёлых металлов высшей водной растительностью водоёмов и водотоков Беларуси // Современные проблемы ландшафтоведения и геоэкологии: Материалы VI Международ. науч. конф. (к

110-летию со дня рожд. проф. В. А. Дементьева), Минск, 13–16 нояб. 2018 г. Минск: БГУ, 2018. С. 132–134.

4. *Шапуловская Е. А.* О накоплении тяжёлых металлов в высшей водной растительности Волгоградского водохранилища // Поволжский экологический журн. 2009. № 4. С. 357–360.

5. *Гришанцева Е. С., Сафронова Н. С., Киртичникова Н. В., Фёдорова Н. П.* Распределение микроэлементов в высшей водной растительности Иваньковского водохранилища // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2010. № 3. С. 223–231.

6. *Линник П. Н., Набиванец Б. И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 272 с.

УДК 551.1/.4 (476.5)

## **СОВРЕМЕННЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛОРУССКОГО ПООЗЕРЬЯ**

**А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая**

Институт природопользования НАН Беларуси,  
ул. Ф. Скорины 10, 220114 Минск, Республика Беларусь; valzern@gmail.com

Проведённые ранее работы [1, 2] показали, что на территории Беларуси, несмотря на её равнинный рельеф и положение в пределах древней платформы, довольно разнообразно представлены современные геологические процессы, экстремальные формы проявления которых могут наносить материальный ущерб экономике страны, неблагоприятно влиять на геоэкологическую обстановку. Для детализации этих представлений в Институте природопользования НАН Беларуси выполняются работы по проекту Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Х18МС–007 «Исследование эволюции природных обстановок и экологических условий на территории Белорусского и Литовского Поозерий в голоценовое время, оценка качества окружающей среды для населения». Полученные результаты по особенностям проявления на этой территории наиболее активных экстремальных экзогенных и техногенных процессов приводятся ниже.

**Экзогенные процессы.** К числу экстремальных видов современной экзогенной геодинамики на изученной территории относятся эрозия временных водотоков, гравитационные, карстовые, суффозионные процессы, наводнения и подтопления, заболачивание территории (рис.).

*Плоскостной эрозии* принадлежит одно из ведущих мест среди экзогенных процессов, как по площади развития, так и по массе перемещаемых отложений. Ей подвержены распахиваемые склоновые поверхности краевых ледниковых возвышенностей и гряд. Плоскостной смыв при значениях до 2 мм/год вполне компенсируется в результате процессов естественного почвообразования [3]. Поэтому при значениях выше 2 мм/год начинает снижаться плодородие почв, а при величинах более 4 мм/год этот процесс приобретает характер природно-антропогенной опасности, так как приводит к значительному недобору урожая, который по разным культурам может варьировать от 5 % до 40 % и более [4].

Наибольшие площади экстремального проявления плоскостной эрозии выявлены на территории Браславской, Городокской и Витебской возвышенностей с интен-