

Алексей И. Романчук<sup>1</sup>, Светлана А. Хомич<sup>2</sup>, Анна О. Данильченко<sup>2</sup>,  
Нина Ю. Суховило<sup>3</sup>, Тамара А. Макаревич<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Силезский университет, Институт наук о Земле, ул. Бендзинска, 60, 41-200 Сосновец, Польша;  
e-mail: aleksy.romanczuk@gmail.com

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, факультет международных отношений, ул. Ленинградская 20,  
220030 Минск, Беларусь; e-mail: khomitch09@mail.ru; anna-daniltchenko@yandex.ru

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет, факультет географии и геоинформатики, ул. Ленинградская 16,  
220030 Минск, Беларусь; e-mail: SukhoviloNY@bsu.by

<sup>4</sup>Белорусский государственный университет, биологический факультет, ул. Курчатова 10, 220045 Минск,  
Беларусь; e-mail: makarta@tut.by

## Морфометрические параметры меловых карьерных водоемов Беларуси как ключевой фактор устойчивого функционирования в условиях рекреационного использования

Ramanczuk A. I., Chomicz S. A., Danilchenko A. O., Suchowilo N. Ju., Makarewicz T. A. **Parametry morfometryczne zbiorników wodnych w wyrobiskach po eksploatacji kredy na Białorusi jako główny czynnik ich zrównoważonego funkcjonowania w warunkach użytkowania rekreacyjnego.** Aktualizacja i badanie nowych, wcześniej niewykorzystywanych zasobów rekreacyjnych zbiorników wyrobiskowych po eksploatacji kredy dla rozwoju turystyki, jako podstawowego kierunku przejścia do zrównoważonego rozwoju terenów zdegradowanych podczas działalności wydobywczej, wymaga uwzględnienia obecnego stanu troficznego oraz perspektyw odnośnie do ich funkcjonowania. Kluczowym czynnikiem determinującym potencjalne właściwości bioprodukcyjne zbiorników jest ich morfologia. Do obliczenia przewidywanych wskaźników produktywności na podstawie parametrów morfometrycznych mis jeziornych stosuje się metodę opartą na ustalonej przez W. P. Romanova statystycznie istotnej odwrotnej zależności między wskaźnikiem osobliwości morfometrycznej epilimnionu  $St$ , a przezroczystością, dzięki której można obliczyć związane z nim utlenianie dwuchromianu i nadmanganianu, a także ilość i biomasę fitoplanktonu. Zintegrowaną ocenę obecnego stanu troficznego zbiorników wodnych w byłych wyrobiskach kredy przeprowadzono za pomocą wskaźników według R. E. Tiidora – poziomu, prędkości oraz gradientu eutrofizacji. Proponuje się zdiagnozowanie perspektyw funkcjonowania zbiorników w warunkach użytkowania turystyczno-rekreacyjnego na podstawie typu i etapu rozwoju produkcyjnej struktury troficznej.

Ramanchuk A. I., Khomich S. A., Danilchenko A. O., Sukhovilo N. Yu., Makarevich T. A. **Morphometric parameters of quarry ponds of Belarus as a key factor for sustainable functioning in conditions of recreational use.** Updating and researching of new, previously unused tourist and recreational resources of career reservoirs for the development of tourism as the basic direction for the transition to sustainable development of territories degraded during mining operations, requires consideration of the modern trophic status of newly formed aquatic systems and the prospects for their functioning. The morphology of technogenic quarries-depressions is considered as a key factor determining the potential bioproduction characteristics of quarry ponds. A method, based on the identification of V. P. Romanov is used for the calculation of the morphometric parameters of the water-bearing basins of the predicted productivity indicators for career reservoirs. This is the statistically significant inverse relationship between the morphometric identity of the  $St$  epilimnion and transparency, which allows one to calculate the bichromate and permanganate oxidation correlating with it, the number and phytoplankton biomass. An integrated assessment of the current trophic state of Limestone reservoirs was carried out. It was based on the method of R.E. Tiidor. It includes the level, speed and gradient of eutrophication. It is proposed to diagnose the

prospects for the functioning of limestone quarry ponds in the conditions of tourist and recreational use on the basis of the revealed type and stage of development of the production-trophic structure.

**Ключевые слова:** меловые карьерные водоемы; морфометрическое своеобразие эпилимниона; уровень, скорость и градиент эвтрофирования; продукционно-трофический статус; водоемы продукционно-макрофитной и продукционно-фитопланктонной ориентации

**Słowa kluczowe:** zbiorniki wyrobiskowe po eksploatacji kredy; sztuczne systemy wodne, wskaźniki bioproduktywności; struktura makrofitów; struktura fitoplanktonu; stan troficzny; zrównoważone użytkowanie

**Key words:** quarry ponds; artificial water systems; bio-productive indicators; macrophytes structure; phytoplankton structure; trophic status; sustainable use

## Аннотация

Актуализация и исследование новых, ранее не использованных туристско-рекреационных ресурсов карьерных водоемов для развития туризма как базового направления перехода к устойчивому развитию территорий, деградировавших в ходе горнодобывающих работ, требует учета современного трофического статуса новообразованных аквальных систем и перспектив их функционирования. В качестве ключевого фактора, определяющего потенциальные биопродукционные характеристики меловых карьерных водоемов, рассматривается морфология техногенных карьеров-котловин. Для расчета по морфометрическим параметрам водовмещающих котловин прогнозных показателей продуктивности карьерных водоемов использован методический прием, основанный на выявленной Романовым В. П. статистически значимой обратной зависимости между показателем морфометрического своеобразие эпилимниона  $St$  и прозрачностью, позволяющей рассчитать коррелирующие с ней бихроматную и перманганатную окисляемость, численность и биомассу фитопланктона. Интегральная оценка современного трофического состояния меловых водоемов проведена с использованием энергетических показателей Р. Э. Тийдора – уроня, скорости и градиента эвтрофирования. Перспективы функционирования меловых карьерных водоемов в условиях туристско-рекреационного использования предложено диагностировать на основании выявленных типа и стадии развития продукционно-трофической структуры.

## Введение

Актуальность оценки современного состояния и перспектив развития новообразованных водоемов определяется прогрессирующим уве-

личением добычи нерудных полезных ископаемых открытым способом и значительным ростом фонда водохозяйственной рекультивации – одного из самых перспективных направлений восстановления хозяйственной ценности нарушенных земель (CASTRO, MOORE, 2000; DAVID, 2007; RZĘTAŁA, 2008; CASTENDYK, EARY, 2009; DAL SASSO, OTTOLINO, CALIANDRO, 2012; ХОМИЧ и др., 2015; KUBIAK, MACHULA, SNOIŃSKI, 2018). Обводненные меловые карьеры обладают принципиальным сходством гидрохимических, биопродукционных, седиментационных процессов с естественными лимническими системами (ХОМИЧ, 2002b; ХОМИЧ и др., 2012, 2013; МАКАРЕВИЧ, САВИЧ, 2014), а также характеризуются рядом специфических черт, обусловленных техногенной природой и молодостью котловины. В отличие от естественных озер, в карьерных водоемах еще только происходит стабилизация продукционно-функциональной структуры и формирование механизмов устойчивости к различным естественным и антропогенным эвтрофирующим воздействиям. Эта особенность новообразованных аквальных систем усугубляется их незначительными размерами и слабыми инерционными свойствами небольших объемов водных масс. Туристско-рекреационное использование меловых карьерных водоемов, связанное с активным воздействием эвтрофирующих факторов, требует оценки современного продукционно-трофического статуса, скорости протекания процессов эвтрофирования, учета и использования естественных механизмов устойчивости объектов водохозяйственной рекультивации. При этом под устойчивостью новообразованных карьерных водоемов понимается способность системы, испытывающей

внешние воздействия, сохранять свою продукционно-функциональную структуру и выполнять в заданных пределах свои природные и хозяйственные функции (АЛЕКИН, СЕМЕНОВ, СКОПИНЦЕВ, 1973; РУМЯНЦЕВ, 1977; РОМАНОВ, 1989; БАЙЧОРОВ, ХОМИЧ, ГИГИНЯК, 2014). Механизм, компенсирующий влияние антропогенных воздействий, заложен в структуре связей между биотической и абиотической частями системы. В процессе эволюции водоема присутствие биотической составляющей обуславливает его способность к активному сохранению своих базовых продукционно-трофических характеристик. Именно присутствие в системе биотической составляющей обеспечивает соответствие лимносистемы изменяющимся внешним условиям, сохранение продукционно-функциональной структуры: макрофитного типа в макрофитных водоемах, и фитопланктонного в водоемах, развивающихся по фитопланктонному пути (ПОКРОВСКАЯ, МИРОНОВА, ШИЛЬКРОТ, 1983). В ходе естественной эволюции макрофитные водоемы оказываются более жизнеспособными и устойчивыми, чем фитопланктонные. Однако в противоположность фитопланктонным озерам, водоемы макрофитной ориентации остаются высокопрозрачными, не загрязненными массовыми скоплениями планктонных водорослей. Именно способность макрофитных озер сохранять неизменным низкий уровень продукционной деятельности фитопланктона, гарантирующий высокое качество вод, даже достигнув высокого трофического статуса, делает их оптимальным прототипом при проектировании водоемов туристско-рекреационного использования на месте отработанных меловых карьеров. В основе названной выше способности к фитомедиации (ХОМИЧ и др., 2012) процесса эвтрофирования в макрофитных водоемах лежит специфика функционирования погруженных макрофитов, которые извлекают питательные вещества не только из воды, но и из донных отложений и используют для этих целей как листья, так и корневую систему. Ткани погруженных макрофитов обладают способностью перехватывать питательные вещества как из соприкасающегося

с грунтом придонного слоя воды, так и из поступающих с водосбора вод поверхностного стока.

С учетом названных преимуществ функционирования макрофитных аквальных систем при решении вопроса о создании экологически устойчивых карьерных водоемов туристско-рекреационного назначения, главной целью следует считать их развитие по макрофитному пути. Среди внутримилических предпосылок формирования макрофитного типа функционирования ключевая роль принадлежит морфометрическим параметрам котловин, определяющим особенности термической стратификации водной массы. Формирование карьеров-котловин с заданными морфометрическими параметрами может осуществляться на этапе горно-технической рекультивации отработанных меловых карьеров с использованием существующей зависимости „морфометрические параметры котловины – показатели трофического статуса аквальной системы”.

Задачи настоящего исследования включали:

- изучение морфометрических параметров модельных новообразованных обводненных меловых карьеров;
- анализ зависимости продукционно-функциональной организации карьерного водоема и его трофического статуса от морфометрических особенностей техногенной котловины;
- разработку алгоритма расчета уровня, скорости и градиента эвтрофирования меловых карьерных водоемов с использованием показателя морфометрического своеобразия трофогенного эпилимниального слоя техногенных карьеров-котловин;
- выбор инструментов для экспресс-оценки трофического статуса существующих водоемов и методических приемов прогнозирования реакции новообразованных аквальных систем на хозяйственное использование в туристско-рекреационных целях;
- разработку рекомендаций по формированию оптимальных морфометрических параметров котловин, позволяющих высшей водной растительности освоить водоем,

обеспечить макрофитный тип продуцирования органического вещества, участие погруженных макрофитов в процессах фитомедиации эвтрофирования меловых карьерных водоемов Беларуси.

## Материалы и методы

В качестве модельных предметов для изучения возможности туристско-рекреационного ис-

пользования объектов водохозяйственной рекультивации выбрана группа обводненных меловых карьеров (месторождение Россь) вблизи поселка городского типа Красносельский: Голубой, Лазурный; Линза-14 (месторождение Колядичи) (Гродненская область), а также карьерный водоем Кричев (Кричевский район, Могилевская область) и карьерные водоемы Хотиново-1 и Хотиново-2 (Любанский район, Минская обл.,) (рис. 1, табл. 1).

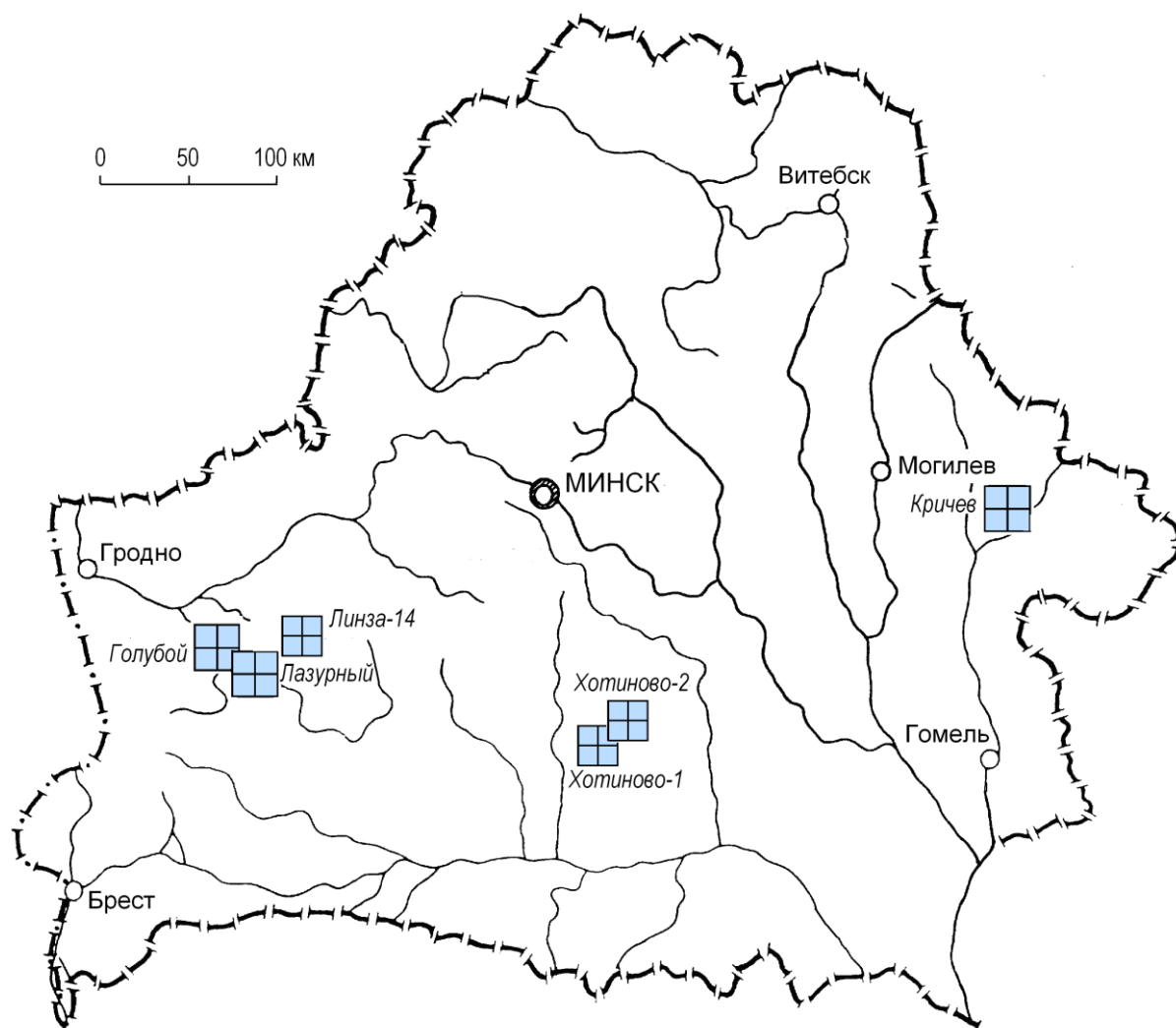


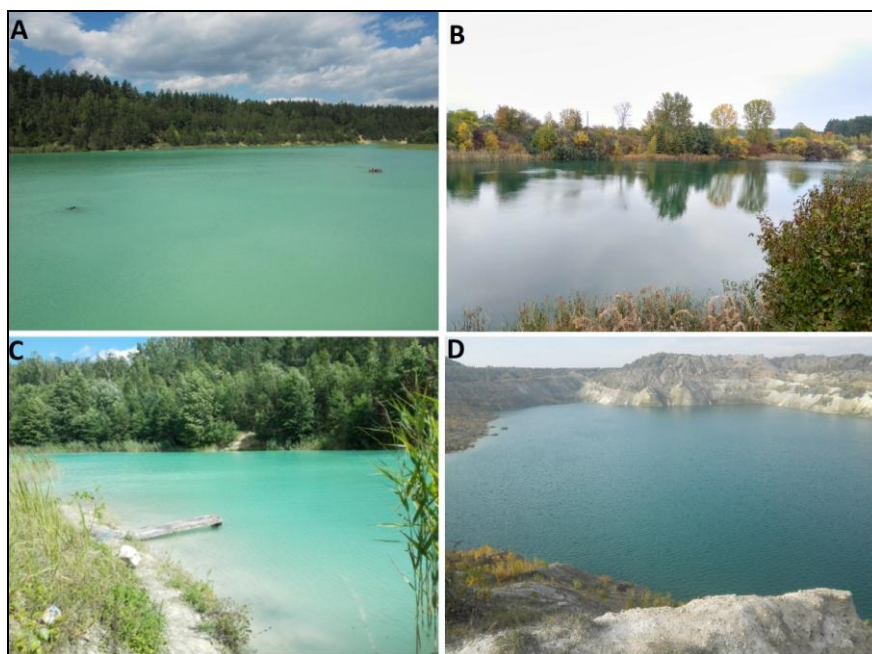
Рис. 1. Карта исследуемых водных объектов в меловых карьерах  
Rys. 1. Lokalizacja badanych obiektów wodnych w byłych wyrobiskach kredy  
Fig. 1. Map of existing chalk quarries in Belarus

Таблица 1. Географические координаты исследованных меловых карьерных водоемов Беларуси  
 Tabela 1. Współrzędne geograficzne badanych zbiorników wyrobiskowych po eksploatacji kredy na Białorusi  
 Table 1. Geographic coordinates of the investigated quarry ponds of Belarus

Название водоема	Географические координаты		Год создания
	Географическая широта	Географическая долгота	
Голубой	53° 15' 26" N	24° 24' 28" E	1961
Лазурный	53° 15' 16" N	24° 25' 21" E	1963
Линза-14	53° 16' 43" N	24° 32' 32" E	2014
Кричев	53° 43' 56" N	31° 42' 34" E	1940
Хотиново-1	52° 52' 14" N	27° 51' 53" E	1965
Хотиново-2	52° 52' 25" N	27° 52' 18" E	1965

Образованные на месте месторождений мелового сырья Россь и Колядичи карьерные водоемы Голубой, Лазурный, Линза-14 имеют компактную вытянутую форму и глубину от 5 до 25 м (фот. 1). Залежи мелового сырья в районе месторождений находились на глубине 10–30 м от дневной поверхности, имели вытянутую линзообразную форму, крутое падение пласта и мощность ископаемого мела до 60 м. Приурочены эти месторождения к повышенным территориям со значительной

(до 10 м) глубиной залегания грунтовых вод. Мощность вскрыши изменялась от 0,2–0,8 до 23 м. При разработке этих меловых месторождений применяется транспортная система отвалообразования. Вскрышные породы отвалов (высотой 3–10 м) размещены у прибортовой части обводненных меловых карьеров. Откосы отвалов и борта карьеров-котловин крутые (до 50–70°), имеют длину от 5 до 60 м, осложнены несколькими уступами (фот. 2).



Фот. 1. Исследованные меловые карьерные водоемы Беларуси:

А – Хотиново-1, В – Голубой, С – Хотиново-2, D – Линза-14 (фот.: А. Романчук, 2018)

Fot. 1. Badane zbiorniki powyrobiskowe po eksploatacji kredy na Białorusi:

A – Chotinowo-1, B – Gołuboj, C – Chotinowo-2, D – Linza-14 (fot. A. Ramanczuk, 2018)

Photo 1. Investigated quarry ponds of Belarus:

A – Khotinovo-1, B – Goluboi, C – Khotinovo-2, D – Linza-14 (phot. by A. Ramanchuk, 2018)



Фот. 2. Водоем Линза-14 (фот.: А. Романчук, 2018)

Fot. 2. Zbiornik wodny Linza-14 (fot. A. Ramanczuk, 2018)

Photo 1. Water reservoir Linza-14 (phot. by A. Ramanchuk, 2018)

Общая площадь территорий, нарушенных при добыче меловых материалов, включая карьеры и сопутствующие им внешние отвалы, достигает 50–100 гектаров. Карьерные водоемы Голубой и Лазурный образованы в результате обводнения выработанных в начале 1970-х годов мощных (до 60 м) отторженцев мела. Заполнение карьеров и последующее питание водоемов осуществлялись за счет вскрытых грунтовых вод, залегающих в пределах месторождения на глубине более 10 м. Оба водоема непроточны. По площади (5,4 га) водоем Голубой превосходит водоем Лазурный (4,9 га), а также обладает более значительными (14 м), чем водоем Лазурный (5,4 м), максимальными глубинами. Специфической чертой обоих водоемов являются крутые, почти отвесные берега высотой 50–60 м. Каждый из водоемов имеет незначительные площади водосборов, достигающие 1,67 км<sup>2</sup> (карьерный водоем Голубой) и 1,51 км<sup>2</sup> (карьерный водоем Лазурный), ограниченные вершинами отвалов вскрыши и пустой породы. На северо-восточном берегу водоема Голубой расположены приусадебные участки поселка городского типа Красносельский. К северо-западному берегу водоема примыкает

дачный поселок, построенный на рекультивированных землях в 1980 году (ХОМИЧ, 2002b). Линза-14 является самым молодым из обследованных водоемов. Максимальная глубина достигает 22 м, площадь – 12,57 га. Высота берегов вместе с отвалами достигает 100 м. Формирование биоты водоема находится на начальной стадии сукцессии.

Карьерный водоем Кричев образован около 100 лет назад на месте отработанного крупного месторождения мела коренного залегания. Это значительный по площади (37,67 га) и самый глубоководный (до 23 м) карьерный водоем. Преобладающими в водоеме являются 15–20-метровые глубины.

Группа меловых карьеров Хотиново-1, Хотиново-2, находится в 20 км от г. Солигорска. Отработанные месторождения были затоплены в 60-ых годах прошлого столетия. Добыча мела велась Любаньским заводом стеновых блоков (ныне завод кирпично-силикатных материалов). Карьерные водоемы: Хотиново-1 и Хотиново-2 находятся на расстоянии 200 м друг от друга. Заполнение карьеров осуществлялось вскрытыми при добыче подземными водами, водами поверхностного стока и атмосферных осадков. Оба водоема непроточны.

Хотиново-1 имеет вытянутую, трапециевидную форму. Береговая линия изрезана. В северо-западной части к водоему подступает борт мелового карьера. На юге водоема высота береговых склонов достигает 6–8 м. Литоральная зона в этой части водоема узкая, её ширина составляет не более 1 м. В восточной части ширина литорального склона достигает 4–15 м. Крутизна сублиторали – 80°. Ложе карьера-котловины плоское. Водоем Хотиново-2 имеет подковообразную форму котловины. Береговая линия характеризуется плавными очертаниями. Надводные склоны карьерного водоема отличаются значительной (до 60–80°) крутизной, отражая техногенное происхождение котловины и являясь бортами отработанного карьера. На отдельных участках отмечена узкая (до 1 м) пляжная полоса, сформированная денудационными процессами. Литоральная зона узкая, шириной 0,5–1,5 м. Сублиторальный склон характеризуется углом падения в 45–60°.

Морфометрические показатели котловин меловых карьерных водоемов Беларуси представлены в табл. 2.

Актуализация ранее полученных данных о морфометрических параметрах котловин, гидрохимических и гидробиологических показателях исследуемых водоемов (ХОМИЧ, ПРОКОПЕНЯ, ХОМИЧ, 1983; ХОМИЧ, 2002b) проводилась в конце летнего сезона 2018 г. Содержание компонентов солевого состава, биогенных элементов в водах, отобранных из поверхностного и придонного горизонтов меловых водоемов Голубой, Лазурный, Линза-14, Кричев, Хотиново-1, Хотиново-2, осуществлялось в Филиале „Центральная лаборатория” Республиканского унитарного предприятия „Научно-производственный центр по геологии” (Республика Беларусь). Содержание сестона определено Т. А. Макаревич (биологический факультет Белорусского государственного университета). Морфометрическое изучение объектов водохозяйственной рекультивации проводилось по материалам мензульной и батиметрической съемок. Измерение глубин водоемов осуществлялось с помощью эхолота EagleFishID 128 по профилю, проло-

женному вдоль оси водоемов и четырем профилям, перпендикулярным ему. Составление батиметрических схем осуществлялось в программе QGIS. Расчет морфометрических показателей котловин выполнен с использованием общепринятых в лимнологии формул (ЯКУШКО, 1981). Прозрачность измерялась с использованием диска Секки (РУМЯНЦЕВ, 1977). Водные пробы для определения гидрохимических показателей отбирались в наиболее глубоководных частях водоемов с учетом термодинамического состояния водных масс и в прибрежной литоральной зоне с учетом освоенности погруженными макрофитами. Данные о вертикальном распределении температур получены с помощью электротермометра ГР 41М-1. Концентрации биогенных элементов определялись колориметрически. При определении фосфора общего и минерального использовались молибдат аммония и хлористое олово (ШИЛЬКРОТ, 1981). Фосфор общий определялся в нефилтрованных пробах воды, фосфорсодержащие органические соединения разрушались в присутствии серной кислоты и персульфата при получасовом кипячении пробы (ЖУХОВИЦКАЯ, ГЕНЕРАЛОВА, 1991). Концентрации азота нитритного и азота аммиачного определялись в первом случае с использованием а-нафтиломиновой и сульфаниловой кислот, а во втором – реактива Неслера. Определение нитратного азота проводилось ионо-селективным методом с применением мембранного электрода ЭМ-NO3-01. Содержание взвешенных веществ (сестона) определено Т. А. Макаревич общепринятым в гидробиологических исследованиях гравиметрическим методом с использованием мембранных фильтров (1,5 мкм). Отбор проб и лабораторные исследования фитопланктона проводили по общепринятым в гидробиологии методикам (БАЙЧОРОВ, ХОМИЧ, ГИГИНЯК, 2014; ТИЙДОР, ТАММЕРТ, ЛОКС, 1979). Пробы отбирали в поверхностном горизонте (глубина отбора 0,5 м). Концентрировали фитопланктон методом отстаивания. Объем для отстаивания составлял 0,5 л. В качестве фиксатора использовался раствор Утермеля.

Таблица 2. Морфометрические параметры котловин меловых карьерных водоемов Беларуси  
 Tabela 2. Charakterystyki morfometryczne badanych zbiorników wyrobiskowych po eksploatacji kredy na Białorusi  
 Table 2. Morphometric parameters of investigated pit basins, formed in the chalk pits in Belarus

Карьерные водоемы	Площадь водоема, га	Площадь водосбора, га	Показатель морфометрического своеобразия	Объем водной массы, млн м <sup>3</sup>	Длина водоема, м	Ширина водоема максимальная, м	Ширина водоема средняя, м	Длина береговой линии, м	Коэффициент изрезанности береговой линии	Глубина водоема максимальная, м	Глубина водоема средняя, м	Удельная емкость водоема, м <sup>3</sup>	Емкость водоема	Площадь мелководной зоны (до 2 м)		Прозрачность в период наблюдения (реальная)	Прозрачность потенциальная, м	Отношение реальной прозрачности к потенциальной
														га	%			
Кричев <sup>1</sup>	37,67	313,0	0,05	4,412	975,0	725,0	386,85	2650,0	1,22	23,0	11,71	1,34	0,51	2,03	5,4	6,8	4,7	1,44
Голубой <sup>1,2</sup>	5,40	167,0	0,06	0,456	580,0	164,0	93,19	1250,0	1,44	14,0	8,44	3,54	0,60	0,40	7,4	2,3	4,2	0,54
Длаурный <sup>1</sup>	4,9	151,0	0,27	0,086	410,0	98,0	55,81	920,0	1,72	5,10	3,75	4,18	0,74	2,64	53,9	1,4	1,4	1,0
Хогиново-1 <sup>2</sup>	4,57	150,0	0,112	0,394	470,0	180,0	108,51	1230,0	1,54	18,8	7,7	4,3	0,41	0,83	16,2	9,0	3,99	2,25
Хогиново-2 <sup>2</sup>	2,22	90,0	0,119	0,169	380,0	120,0	65,78	900,0	1,61	19,4	6,7	5,4	0,34	0,39	15,6	5,9	3,81	1,54
Линза-14 <sup>2</sup>	12,57	-	0,09	1,130	590,0	280,0	213,05	1540,0	1,23	22	8,9	2,76	0,40	0,85	6,7	4,8	4,69	1,03

Обозначения: «-» – нет данных;  
<sup>1</sup>ХОМИЧ С. А. (2001; 2002), <sup>2</sup>Собственные данные авторов



## Результаты и их обсуждение

Техногенное происхождение котловин меловых водоемов обеспечивает возможность на этапах горнотехнической рекультивации и обустройства водовмещающей котловины целенаправленно влиять на гидродинамические и биопродукционные процессы потенциальных объектов водохозяйственной рекультивации. Именно в пределах рамок, определенных морфологией котловины, происходит естественный процесс развития экосистемы: формируется продукционно-функциональная структура определенного типа и механизмы устойчивости к эвтрофирующим воздействиям. В основе определяющей связи между морфологией котловины и биопродукционными характеристиками меловых водоемов лежит плотностная, температурная, химическая и биологическая неоднородность – стратификация водной массы.

Для расчета по морфометрическим параметрам водовмещающих котловин биопродукционных и гидрохимических характеристик карьерных водоемов (табл. 3) использован методический прием В. П. РОМАНОВА (1989), основанный на использовании статистически значимой обратной зависимости между показателем морфометрического своеобразия эпилимниона  $S_t$  и прозрачностью. Выявленная зависимость позволяет рассчитать потенциальную прозрачность проектируемых водоемов и ряд коррелирующих с ней потенциальных показателей продуктивности. Показатель морфометрического своеобразия эпилимниона  $S_t$  рассчитывается по формуле:

$$S_t = \frac{1}{h_{cp}} \cdot \frac{1 - (1 - U)^2}{1 - (1 - U)^{\alpha + 1}}, \quad (1)$$

где  $h_{cp}$  – средняя глубина будущего водоема;  
 $U$  – относительная глубина, определяемая по формуле  $U = \frac{\tau}{h}$ , где  $\tau$  – глубина эпилимниона,  
 $h$  – максимальная глубина водоема;

$$\alpha = \frac{h - h_{cp}}{h_{cp}}.$$

Зависимость между прозрачностью и показателем эпилимниона описывается уравнением регрессии:

$$y = 0,79 \cdot x^{-0,74} \quad (2)$$

Значение прозрачности в свою очередь коррелирует с другими биопродукционными показателями:

- бихроматной окисляемостью:

$$y = 39,63 \cdot x^{-0,352} \quad (3)$$

- перманганатной окисляемостью:

$$y = 10,76 \cdot x^{-0,455} \quad (4)$$

- биохимическим потреблением кислорода (БПК<sub>5</sub>):

$$y = 3,18 \cdot x^{-0,798} \quad (5)$$

- цветностью:

$$y = 38,28 \cdot x^{-0,383} \quad (6)$$

- биомассой фитопланктона:

$$y = 6,65 \cdot x^{-1,281} \quad (7)$$

- численностью фитопланктона:

$$y = 20,89 \cdot x^{-1,382} \quad (8)$$

Для исследованных шести меловых карьерных водоемов Беларуси с использованием приведенных выше зависимостей, рассчитаны потенциальные значения биопродукционных показателей, представленные в табл. 3 в сравнении с аналогичными показателями, полученными в ходе проведенных полевых исследований (табл. 3).

Рассчитанную с использованием индекса морфометрического своеобразия котловин потенциальную прозрачность предложено использовать в соотношении с реальной прозрачностью в качестве экспрессного показателя, диагностирующего трофический статус и тип продукционной структуры карьерного водоема. Проведенные исследования (ХОМИЧ, 1996) показывают, что отношение реальной прозрачности к рассчитанной потенциальной, превышающее 1, отражает ведущую роль погруженных макрофитов в продуцировании органического вещества. Отношение же реальной прозрачности к расчетной меньше 1 указывает на преобладание фитопланктона в процессах фотосинтеза. Среди исследованных обводненных меловых карьеров самым высокопрозрачным макрофитным водоемом оказался водоем Хотиново-1. Потенциальная прозрачность в этом водоеме составляет 3,99 м, в то время как реальная прозрачность, обес-

Таблица 3. Морфометрические, физико-химические и биопродукционные показатели меловых карьеров Беларуси

Tabela 3. Podstawowe charakterystyki morfometryczne, fizyczno-chemiczne oraz biogeniczne badanych zbiorników na Białorusi

Table 3. Morphometric parameters, components of salt composition and biogenic elements in the waters of quarry ponds of Belarus

Показатели	Кричев	Голубой	Лазурный	Хотиново-1	Хотиново-2	Линза-14
<b>МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАРЬЕРОВ-КОТЛОВИН</b>						
<b>Глубина водоема, м</b>						
максимальная	23,0	14,0	5,10	18,8	19,4	22,0
средняя	11,71	8,44	3,75	7,7	6,7	8,9
<b>Площадь</b>						
водоема, га	37,67	5,40	4,9	4,57	4,22	12,57
литоральной зоны, %	5,4	7,4	53,9	16,2	15,6	6,7
Показатель морфометрического своеобразия эпилимниона, St	0,05	0,06	0,27	0,112	0,119	0,09
<b>ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ И РЕАЛЬНЫЕ БИОПРОДУКЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ</b>						
<b>Прозрачность, м</b>						
потенциальная	4,7	4,2	1,4	3,99	3,81	4,69
реальная (наблюдённая)	6,8	2,3	1,3	9,0	5,9	4,8
средняя реальная	4,5	3,0	1,2			
Реальная и потенциальная перманганатная окисляемость, мг O <sub>2</sub> /л	4,48 5,32	7,36 5,66	1,34 9,23	- -	- -	- -
Реальная и потенциальная бихроматная окисляемость, мг O <sub>2</sub> /л	20,13 22,98	29,56 24,12	- 35,2	- -	- -	- -
Реальная и потенциальная цветность, град.	18 21	28 22	6 34	- -	- -	- -
Реальное и потенциальное БПК <sub>5</sub> , мг O <sub>2</sub> /л	0,68 0,92	1,64 1,03	- 2,43	- -	- -	- -
Реальная и потенциальная численность фитопланктона, млн кл./л	0,53 2,46	4,79 2,97	0,11 13,12	- -	- -	- -
Реальная и потенциальная биомасса фитопланктона, г/м <sup>3</sup>	0,49 0,92	1,46 1,09	0,14 4,32	- -	- -	- -
<b>Полифосфаты (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>), мг/дм<sup>3</sup></b>						
поверхность	-	0,05	-	0,03	<0,0001	0,01
дно	-	0,07	-	0,01	0,02	<0,01
<b>Фосфаты, мг/дм<sup>3</sup></b>						
поверхность	0,0039	0,06	0,002	0,04	0,01	0,02
дно	0,0052	0,11	0,004	0,03	0,07	0,02
<b>Нитраты (NO<sub>3</sub>), мг/дм<sup>3</sup></b>						
поверхность	0,24	0,2	0,05	0,14	0,20	0,6
дно	0,26	0,6	0,04	0,23	0,29	0,3
<b>Нитриты (NO<sub>2</sub>), мг/дм<sup>3</sup></b>						
поверхность	0,137	0,01	0,0008	<0,01	<0,01	0,01
дно	0,107	0,02	0,0031	<0,01	<0,01	0,01

<b>Аммоний (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), мг/дм<sup>3</sup></b>						
поверхность	0,42	<0,01	0,09	<0,01	<0,01	<0,01
дно	0,34	<0,01	0,85	<0,01	<0,01	<0,01
<b>Сестон, мг/дм<sup>3</sup>, среднее</b>						
поверхность	-	1,29	-	0,90	0,73	2,03
дно	-	5,56	-	1,33	4,67	2,71
<b>ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ</b>						
Энергетический индекс (уровень эвтрофирования, E)	115,13	89,58	109,51	-	-	-
Индекс продуктивности (скорость эвтрофирования K)	54,15	19,87	11,16	-	-	-
Градиент эвтрофирования $D = E/K$	2,1	4,5	9,8	-	-	-

Источник: составлено по результатам собственных исследований авторов.

печенная барьерной функцией погруженных макрофитов, достигает 9 м (табл. 2). Выше расчетных показателей прозрачности значения реальной прозрачности в водоемах Кричев, Хотиново-2 и Линза-14. Отношение реальной прозрачности к потенциальной изменяется от 1,03 в самом молодом, с еще не сформированным макрофитным поясом, обводненном карьере Линза-14 до 1,54 в карьерном водоеме Хотиново-2 (табл. 2). Диагностированное в водоемах превышение реальной, обеспеченной биопродукционными процессами, прозрачности над прозрачностью прогнозной, рассчитанной по морфометрическим показателям карьеров-котловин, свидетельствует о продуцировании органического вещества преимущественно за счет погруженных макрофитов и эффективном перехвате и изоляции в тканях высших водных растений эвтрофирующих веществ. Подтверждением продукционно-макрофитной ориентации, естественных механизмов фитомедиации процесса эвтрофирования и невысокого трофического статуса названных карьерных водоемов служат и данные о содержании соединений фосфора, азота и сестона в поверхностных и придонных водах (табл. 3). Единственным среди исследованных меловым карьерным водоемом, имеющим отношение реальной прозрачности к расчетной меньше 1 (0,54) является Голубой. Этот водоем испытывал практически с самого начала своего существования значительное антропогенное воздействие со стороны водосборной территории, занятой дачными участками. Несформированная оконча-

тельно продукционно-макрофитная структура новообразованного карьерного водоема Голубой не смогла эффективно противостоять процессам антропогенного эвтрофирования. Площадь литоральных мелководий в неподготовленном специально карьере-котловине не превышала 0,40 га и была заселена лишь отдельными колониями *Elodea canadensis*, ткани которых были существенно перенасыщены соединениями азота (0,44–0,96% абсолютно сухого вещества) и фосфора (2,35–3,12% абсолютно сухого вещества) (ХОМИЧ, 2002а), что многократно превышает критические значения содержания этих биогенных веществ в тканях высших водных растений ( $N > = 1.3\%$ ,  $P > = 0.3\%$  абсолютно сухого вещества) (ПОКРОВСКАЯ, МИРОНОВА, ШИЛЬКРОТ, 1983). Незначительная по площади литоральная зона, невысокое проективное покрытие погруженных макрофитов, перенасыщение их тканей соединениями азота и фосфора не позволили высшей водной растительности занять в карьерном водоеме Голубой лидирующие позиции и выполнить барьерную функцию. Приоритетная роль фитопланктона в продуцировании органического вещества в этом водоеме и его высокий трофический статус подтверждаются данными о высоком содержании соединений фосфора в поверхностном и придонном слое воды, а также высоким содержанием сестона (табл. 3).

Приведенное в табл. 3 сравнение реальных и потенциальных биопродукционных показателей меловых резюмированы расчетом показателей экологической устойчивости меловых

карьерных водоемов: уровня эвтрофирования  $E$ , скорости эвтрофирования  $K$  (Тийдор, 1983, 1984) и градиента эвтрофирования  $\Delta$  (отношение  $E/K$ ), разработанного специально для объектов водохозяйственной рекультивации (ХОМИЧ, 2002b) и характеризующего способность аквальных систем к наращиванию трофического статуса. За единицу устойчивости объектов водохозяйственной рекультивации предложено считать градиент эвтрофирования водоемов продукционно-макрофитного типа в мезотрофном состоянии, равный единице ( $\Delta = E/K = 1$ ). Уровень эвтрофирования рассчитывается по формуле  $E = \alpha \cdot T \cdot [CO_2] \cdot [O_2]$ , скорость протекания процесса эвтрофирования рассчитана как индекс продуктивности с помощью формулы:

$$K = \frac{[O_2] \cdot Q}{[[CO_2]_2]}$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий наличие энергетически активных примесей в водоеме;  $T$  – температура;  $CO_2$ ,  $O_2$  – содержание двуокиси углерода и кислорода и  $Q$  – содержание органического вещества по бихроматной окисляемости.

Трофический статус исследуемых водоемов контролировался, помимо энергетических показателей экологической устойчивости, также данными, полученными в период полевых исследований 2018 года по содержанию в отобранных пробах сестона, хлорофилла (рис. 2 и 3). Высокие показатели сестона в водоеме Линза-14 и водоеме Голубой определяют начальную стадию сукцессионного процесса (Линза-14) и диагностирует высокий трофический статус макрофитно-эвтрофного водоема Голубой (рис. 2). По содержанию хлорофилла зафиксировано аналогичное распределение этого показателя по вертикали: максимальное содержание хлорофилла зафиксировано в трофогенном и трофолетическом слоях водоемов Линза-14 и Голубой (рис. 3).

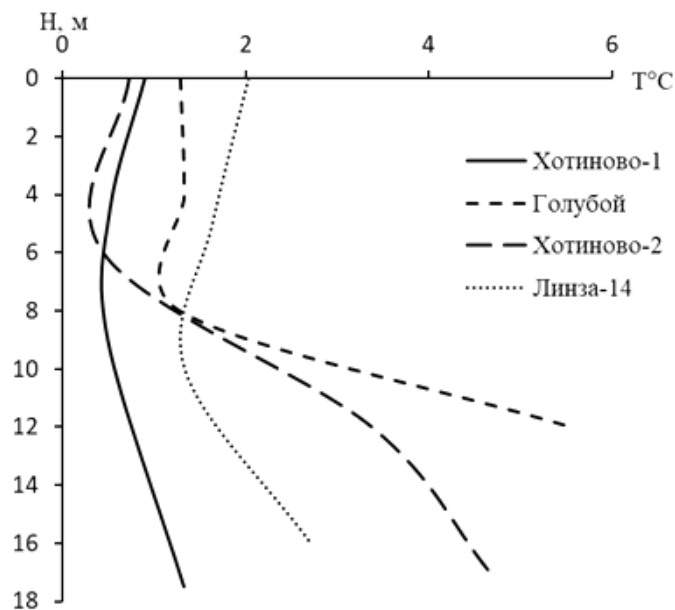


Рис. 2. Содержание сестона в воде меловых карьерных водоемов, октябрь – ноябрь 2018 г.

Rys. 2. Zawartość sestonu w wodzie badanych zbiorników, październik – listopad 2018 r.

Fig. 2. Seston maintenance in the water of quarry ponds, October – November 2018

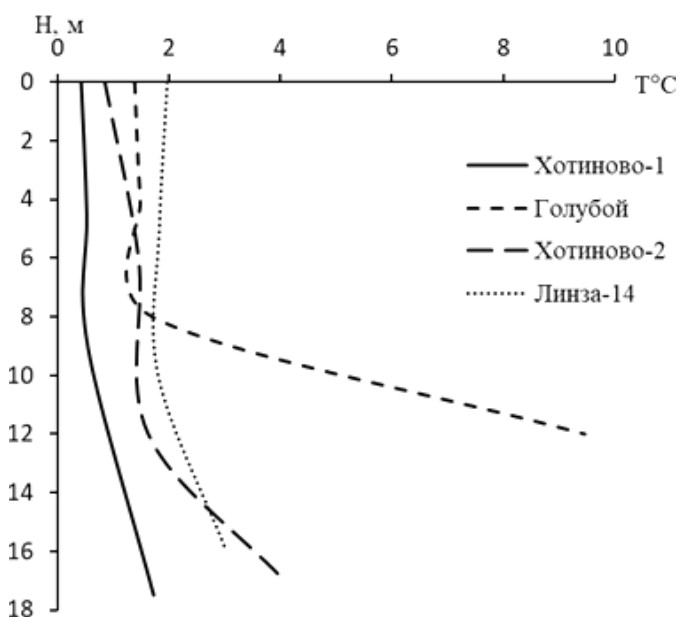


Рис. 3. Содержание хлорофилла в воде меловых карьерных водоемов, октябрь – ноябрь 2018 г.

Rys. 3. Zawartość chlorofilu w wodzie badanych zbiorników, październik – listopad 2018 r.

Fig. 3. Chlorophyll maintenance in the water of quarry ponds, October – November 2018

Алгоритм расчета потенциальных биопро-  
дукционных характеристик карьерных водо-  
емов с использованием показателя морфоме-

трического своеобразия эпилимниона пред-  
ставлен на рис. 4.

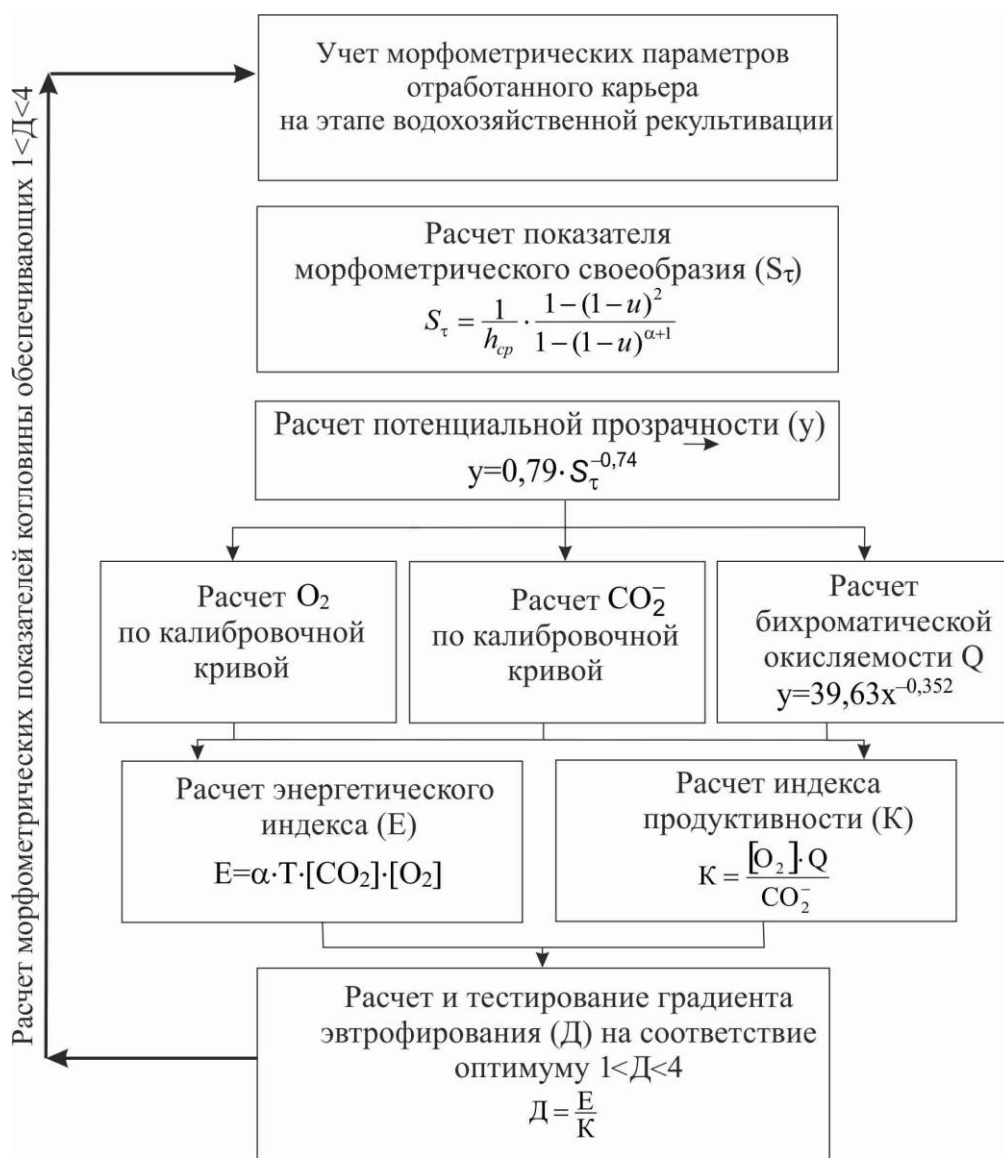


Рис. 4. Методическая схема оценки потенциальных биопро-  
дукционных показателей и трофического статуса меловых карьерных водоемов

Rys. 4. Schemat metodologiczny oceny potencjalnych wskaźników bioprodukcji oraz stanu troficzego  
zbiorników wyrobiskowych po eksploatacji kredy

Fig. 4. Methodological scheme for assessing potential bioproduction indicators and trophic status  
of chalk quarry ponds

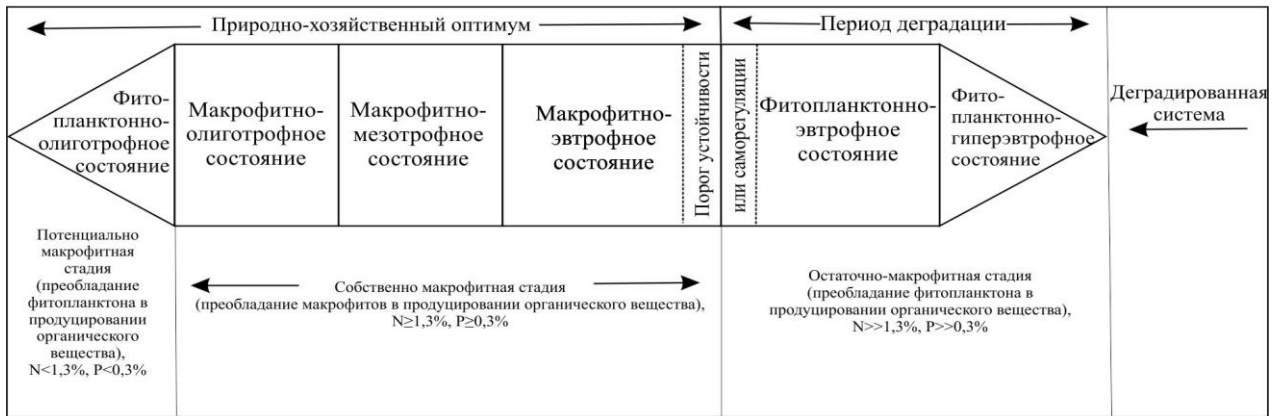
С использованием энергетических пока-  
зателей Р. Э. Тийдора предложено осущес-  
твлять оценку современного трофического со-  
стояния меловых водоемов (уровень, скорость  
и градиент эвтрофирования). Перспективы  
функционирования меловых карьерных водо-  
емов в условиях туристско-рекреационного

использования предложено диагностировать  
на основании выявленных типа и стадии раз-  
вития продукционно-трофической структуры  
водоема. Комплексные лимнологические ис-  
следования структурных и функциональных  
характеристик карьерных водоемов свиде-  
тельствуют о двух основных путях развития объек-

тов водохозяйственной рекультивации: продукционно-макрофитном и продукционно-фитопланктонном, отличающихся уровнем устойчивости водоемов к внешним и внутрен-

ним эвтрофирующим воздействиям, длительностью периода природно-хозяйственного оптимума (рис. 5).

### Продукционно-макрофитный тип функционирования водоемов



### Продукционно-фитопланктонный тип функционирования водоемов

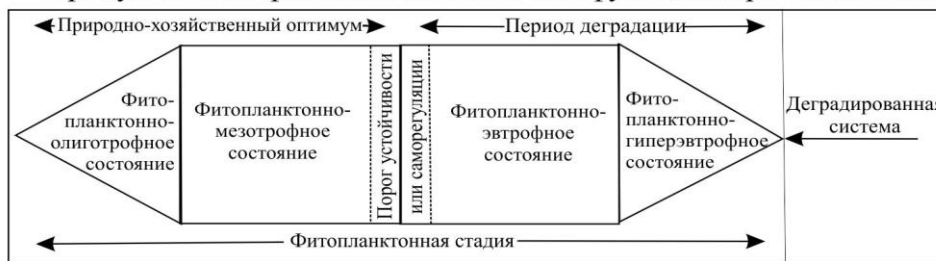


Рис. 5. Схемы эволюционного развития водоемов продукционно-макрофитного и продукционно-фитопланктонного типов

Rys. 5. Schematy ewolucyjnego rozwoju zbiorników typu makrofitowego i fitoplanktonowego  
Fig. 5. Schemes of the evolutionary development of reservoirs of macrophytic and phytoplankton structures

Для водоемов макрофитного типа выделены три стадии развития продукционно-функциональной структуры: потенциально макрофитная, собственно макрофитная и остаточно-макрофитная. Диагностировать стадийные переходы продукционно-макрофитных систем предложено по содержанию в тканях погруженных макрофитов соединений азота и фосфора. Водоемы фитопланктонной ориентации проходят только одну продукционно-фитопланктонную стадию. Ведущим продуцентом органического вещества на протяжении всего периода развития водоема выступает фитопланктон. На поступление эвтрофирующих веществ водоем реагирует в соответствии с классическим представлением об эвтрофировании – ростом продуктивности фитопланктона, снижением

прозрачности, увеличением содержания биогенных элементов в водах и донных осадках, переходом от низкотрофного состояния к высокотрофному (ХОМИЧ, 2002а). Эволюционные схемы развития разнотипных карьерных водоемов позволяют определить современное состояние новообразованных аквальных систем, охарактеризовать тенденции и перспективы их дальнейшего развития. Продукционно-трофические состояния карьерных водоемов включают характеристику ведущего продуцента органического вещества и трофический статус водоема (макрофитно-мезотрофное, макрофитно-эвтрофное и т.д.). Стадийные переходы могут тестироваться по результатам тканевого анализа погруженных макрофитов, а также с помощью градиента эвтрофирования  $D$  (отношение энергетич-

ческого индекса Е к индексу продуктивности К).

Благополучное состояние макрофитных водоемов в период природно-хозяйственного оптимума (до „порога устойчивости“) обеспечивается совершенным механизмом устойчивости продукционно-макрофитной системы. Использование модели „морфологические параметры вмещающей котловины – биопродукционные показатели“ (рис. 5) и анализ потенциальных продукционных возможностей водоема служат основой для выбора оптимального направления рекультивации, определяют целесообразность туристско-рекреационного освоения карьерных водоемов. Комбинируя этот подход к изучению перспектив карьерных водоемов с приведенной выше возможностью количественной оценки их состояния (положение в ряду эволюционного развития), можно целенаправленно формировать устойчиво функционирующие водоемы макрофитного типа, осуществлять контроль процесса трофического статуса. Расчет потенциальных показателей продуктивности водоемов, в основе которого лежит учет техногенных морфометрических характеристик, позволяет на стадии проектирования водоемов предложить оптимальные морфометрические параметры будущих карьеров-котловин. Основной задачей геоэкологического проектирования объектов водохозяйственной рекультивации для туристско-рекреационного использования является обеспечение и поддержание новообразованной аквальной системы в пределах ее оптимума с градиентом эвтрофирования до 4,0. Чем ниже градиент эвтрофирования, тем совершеннее механизм устойчивости – „иммунитет“ водоема к эвтрофирующим воздействиям.

Важной морфометрической предпосылкой формирования продукционно-макрофитной структуры водоема являются литоральные мелководья, пригодные для освоения погруженной растительностью. Прибрежные мелководья должны иметь пологое с небольшим уклоном дно. Существенное значение для укоренения погруженной растительности имеет также субстрат, которым сложена литоральная часть водоема. Обширные прибреж-

ные отмели, характеризующиеся медленным нарастанием глубин и значительной прозрачностью воды, слабо осваиваются погруженными макрофитами, если их дно покрыто крупной галькой, камнями или подвержено волновой деятельности. Отсутствие прибрежных мелководий препятствует распространению погруженных макрофитов. В результате питательные вещества, поступающие с водосбора и не встречающиеся на своем пути защитного барьера, становятся доступными для фитопланктонного сообщества. К числу морфометрических условий, также не способствующих быстрому заселению водоема погруженной растительностью, относится большая открытость озерных котловин, определяющая интенсивное ветро-волновое перемешивание, активную переработку берегов. Такие участки литоральных зон могут быть освоены отдельными видами погруженных макрофитов, с широкой экологической амплитудой (*Potamogeton perfoliatus*).

Техногенное происхождение котловин карьерных водоемов позволяет уже на этапе превращения отработанного карьера в котловину будущего водоема рекомендовать технически возможные, экономически и экологически обоснованные мероприятия по созданию аквальной системы продукционно-макрофитной ориентации. Подготовка котловины и ванны карьерного водоема, дноуглубительные работы, обязательная отсыпка литоральной зоны, на которую должно приходиться до 5–10% акватории, закрепление надводной части откосов и берегов водоема, предупреждающее оползневые явления, выравнивание береговой линии – все это с учетом присущих лимническим системам зависимостей призвано способствовать целенаправленному становлению водоема макрофитного типа. Возможность расчета потенциальных показателей продуктивности водоемов, основанного на учете техногенно-обусловленных морфометрических характеристик, обеспечивает разработку и заложение в проект водохозяйственной рекультивации оптимальных морфометрических параметров водовмещающих котловин, способствующих длительному, устойчивому функционированию новообразованных

аквальных систем. Основное содержание работ по превращению разнотипных карьерных выработок в озерные ванны с заданными параметрами составляют следующие мероприятия, осуществляемые в процессе горнотехнической рекультивации:

- отсыпка зоны прибрежных мелководий (до глубины 2,0 м подводная часть откоса должна иметь заложение 1:2) для заселения водоема погруженными макрофитами. Размеры литоральной зоны должны составлять не менее 10–25% площади акватории;
- дноуглубительные работы, позволяющие увеличить объем водной массы (а значит, и инерционные свойства водоема) без увеличения площади акватории. При проектировании и проведении дноуглубительных работ следует учитывать, что оптимальной формой котловины, обеспечивающей стратификацию водной массы и ее стабильность, является форма, подобная цилиндру или полуэллипсоиду. Соотношение между средней и максимальной глубинами – форменный коэффициент – в этом случае должен изменяться от 0,66 до 1 (Якушко, 1981). Вопрос о наличии стратификации и ее стабильности приобретает особо важное значение. При небольшом поступлении биогенных элементов с поверхностным стоком стратификация резко ограничивает продукционные возможности фитопланктона и создает выгодные условия для развития погруженных макрофитов;
- формирование пляжных участков выполаживанием бортов карьеров (крутизна 1:3 в зоне, простирающейся от уреза воды до отметки на 1 м выше максимального уровня воды);
- укрепление надводной части берегов, предупреждающее развитие оползневых процессов, ведущих к уничтожению погруженных макрофитов, осваивающих водоем;
- выравнивание береговой линии, направленное на ликвидацию застойных „бухточек“, характеризующихся неблагоприятным газовым режимом, значительным распространением нитчатых водорослей, оказывающих негативное влияние на биопродукционный режим водоема.

## Заключение

Проведена батиметрическая съемка и рассчитаны основные морфометрические показатели котловин шести меловых карьерных водоемов Беларуси.

Предложен алгоритм расчета потенциальных биопродукционных показателей: уровня эвтрофирования, скорости эвтрофирования и градиента эвтрофирования, отражающих способность новообразованной аквальной системы к наращиванию уровня трофии, основанный на использовании зависимости между показателем морфометрического своеобразия эпилимниона и прозрачностью.

Проведен сравнительный анализ потенциальных и реальных биопродукционных показателей исследованных меловых карьерных водоемов. Все исследованные водоемы отнесены к числу аквальных систем продукционно-макрофитного типа. Высокий трофический статус зафиксирован в водоемах Кричев, Лазурный, Голубой. Наибольшая скорость протекания процессов эвтрофирования выявлена в макрофитно-мезотрофном водоеме Кричев. Но благодаря совершенным механизмам фитомедации этот карьерный водоем остается высокопрозрачным и пригодным для использования в туристско-рекреационных целях. К числу макрофитных слабоэвтрофных с хорошо сформированными механизмами устойчивости отнесены меловые карьерные водоемы Хотиново-1 и Хотиново-2. Недавно вышедший из промышленной эксплуатации обводненный меловой карьер Линза-14 только формирует продукционно-функциональную структуру макрофитного типа и в настоящее время находится на ранних стадиях сукцессионного процесса.

С использованием энергетических показателей Р. Э. Тийдора и схем эволюционного развития водоемов продукционно-макрофитной и продукционно-фитопланктонной ориентации предложено диагностировать не только современное состояние, но и перспективы развития меловых карьерных водоемов в условиях туристско-рекреационного воздействия.



Предложен методический подход к экспресс-оценке трофического статуса меловых карьерных водоемов, основанный на использовании соотношения расчетной потенциальной и реальной прозрачности исследованных карьерных водоемов Беларуси.

Благодаря определяющей связи между морфологией техногенных водовмещающих котловин и биопродукционным своеобразием водоемов показана возможность создания оптимальной продукционно-функциональной структуры меловых карьерных водоемов на этапе горнотехнической рекультивации.

Исходным управленческим решением ревитализации меловых карьерно-отвалных комплексов предложено считать ориентацию формируемых водоемов на создание макрофитных продукционных систем, способных к эффективному саморегулированию, фитомедиации процессов эвтрофирования и длительному устойчивому существованию в условиях туристско-рекреационного использования.

Концепция управления меловыми карьерно-аквальными комплексами состоит в поддержании природно-техногенной аквальной системы в пределах „потенциального оптимума“ (изменение градиента эвтрофирования от 1 до 4), обеспеченного в макрофитных водоемах оптимальными морфометрическими параметрами карьеров-котловин, барьерной функцией погруженных макрофитов и мониторингом пороговых биопродукционных показателей.

## Литература

Алекин О., Семенов А., Скопинцев Б., 1973: Руководство по химическому анализу вод суши. Гидрометеиздат, Ленинград: 269 с.

Байчоров В., Хомич С., Гигиняк Ю., 2014: Проблема изучения и использования водоемов оработанных меловых карьеров. В: Актуальные проблемы биоэкологии, 23–25 окт. 2014 г. Минск: 26–30.

Жуховицкая А., Генералова В., 1991: Геохимия озёр Белоруссии. Наука и техника, Минск: 204 с.

Макаревич Т., Савич И., 2014: Фитопланктон и уфитоперифитон в разновозрастных карьерных водоемах оработанных меловых месторождений (Беларусь). In: Salaru V. et al. (eds): V International Conference “Actual problems in modern phycology”, 3–5 nov. 2014 Chisinau, Moldova. CEP USM, Chişinău: 199–204.

Покровская Т., Миронова Н., Шилькрот Г., 1983: Макрофитные озера и их эвтрофирование. Наука, Минск: 153 с.

Романов В., 1989: Использование морфометрических параметров при определении природного потенциала водоемов. В: Рациональное использование и охрана озерных водоемов: тез. докл. VIII Всесоюзн. совещ., Минск, 1989 г. Минск: 254–255.

Румянцев В., 1977: Прозрачность воды. Озеро Кубенское. В: Сб. научн. Трудов АН СССР. Институт озероведения. Гидрометеиздат, Ленинград: 168–175.

Тийдор Р., 1983: Энергия и энтропия в гидросистеме. В: Антропогенное эвтрофирование природных вод: Тез. докл. Третьего Всесоюзн. симпоз., Москва, сентябрь 1983 г. Черноголовка: 27–28.

Тийдор Р., 1984: Об энергетических возможностях оценки и прогнозирования состояния водоема как экосистемы. В: Моделирование переноса вещества и энергии в природных системах. Новосибирск: с. 192.

Тийдор Р., Таммерт Х., Локс С., 1979: Химико-бактериологическое изучение некоторых заиленных озер Эстонии В: Изучение и освоение водоемов Прибалтики и Белоруссии: Тез. докл. 20-й науч. конф., Т. 1. Рига: 32–35.

Хомич А., Прокопья В., Хомич С., 1983: Карьерные водоемы Белоруссии как объект лимнологических исследований. История озер в СССР: тез. докл. VI всесоюзн. совещ., Т. II, Таллин, 1983 г. АН ЭССР, Ин-т геологии, Ин-т зоологии и ботаники. Таллин: 224 с.

Хомич С., 1996: Подходы к оценке состояния и перспектив развития объектов водохозяйственной рекультивации. Литосфера, 6: 80–92.

Хомич С., 2001: Геоэкологические аспекты водохозяйственной рекультивации нарушенных земель Беларуси. Институт геологических наук, Минск: 124 с.

Хомич С., 2002а: Аквальные геотехнические системы на месте карьерно-отвалных комплексов. География и природные ресурсы, 4: 37–40.

- Хомич С., 2002b: Геоэкологические основы водохозяйственной рекультивации карьерно-отвальных комплексов Беларуси. Дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.36. Минск.
- Хомич С., Аношко Я., Данильченко А., Дикарева Ю., 2012: Геоэкологические принципы туристско-рекреационного использования обводненных карьеров Беларуси. Вестник фонда фундаментальных исследований, 4: 50–59.
- Хомич С., Аношко Я., Данильченко А., Дикарева Ю., 2013: Ключевые элементы концепции геоэкологического обеспечения туристско-рекреационного использования карьерных водоемов Беларуси. Вестник фонда фундаментальных исследований, 1: 67–79.
- Хомич С., Данильченко А., Зубряков А., Казарина Н., Яночкина Н., 2015: Геоэкологическое обеспечение туристско-рекреационного использования карьерных водоемов Беларуси. БГУ, Минск: 223 с.
- Шилькрот Г., 1981: О возможности использования эмпирических зависимостей для прогноза евтрофирования озер. Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1: 41–50.
- Якушко О., 1981: Озероведение: География озер Белоруссии. Вышэйш. шк., Минск: 223 с.
- Castendyk D. N., Eary L. E. (eds.), 2009: Mine pit lakes: characteristics, predictive modeling, and sustainability. Management technologies for metal mining influenced water, 3. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, USA: 304 p.
- Castro J. M., Moore J. N., 2000: Pit lakes: their characteristics and the potential for their remediation. Environmental Geology, 39(11): 1254–1260.
- Dal Sasso P., Ottolino M. A., Caliandro L. P., 2012: Identification of Quarries Rehabilitation Scenarios: A Case Study Within the Metropolitan Area of Bari (Italy). Environmental Management, 49(6): 1174–1191.
- David L., 2007: Anthropogenic geomorphological and after-use problems of quarrying: case studies from the UK and Hungary. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 30: 161–165.
- Kubiak J., Machula S., Choiński A., 2018: Particular example of meromoxis in the anthropogenic reservoir. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 13, 1: 5–13.
- Rzętała M., 2008: Funkcjonowanie zbiorników wodnych oraz przebieg procesów limnicznych w warunkach zróżnicowanej antropopresji na przykładzie rejonu górnośląskiego. UŚ, Katowice: 171 s.
- StatSoft, Inc. 2009. STATISTICA (data analysis software system), version 9.0. www.statsoft.com

*Поступила в редакцию: 25 октября 2019*

*Wpłynął do redakcji: 25 października 2019*

*Received: 25 October 2019*