МАКСИМОВИЧ Н.Г.
Заместитель директора по научной работе Естественно-научного института Пермского государственного университета, nmax@psu.ru
ВОРОНЧИХИНА Е.А.
Старший научный сотрудник Естественно-научного института Пермского государственного университета
ПЬЯНКОВ С.В.
Директор ГИС Центра Пермского государственного университета, psv@psu.ru
ПЕРВОВА М.С.
Аспирант геологического факультета Пермского государственного университета, maria.pervova@mail.ru
ШАВНИНА Ю.Н.
Доцент Пермского государственного университета, shavninaj@psu.ru

MAXIMOVICH N.G.
Deputy director for scientific work of the Institute of Natural Sciences of Perm State University, nmax@psu.ru
VORONCHIHINA E.A.
Senior stuff scientist of the Institute of Natural Sciences of Perm State University
PYANKOV S.V.
The director of the GIS Center of Perm State University, psv@psu.ru
PERVOVA M.S.
Postgraduate student of the geology department of Perm State University, maria.pervova@mail.ru
SHAVNINA J.N.
Associate professor of Perm State University, shavninaj@psu.ru

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОМОЩЬЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ESTIMATION OF THICKNESS AND ECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF WATER-STORAGE RESERVOIR BOTTOM SEDIMENTS USING GEOINFORMATION MODELING

Ключевые слова: геоинформационное моделирование; Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей; мощность донных отложений; экологическая оценка; сработка водохранилища.

Аннотация: более трех четвертей водохранилищ мира имеют небольшой объем (менее 100 млн м^3). При хозяйственном использовании таких водохранилищ часто возникают проблемы, связанные с процессами заиливания и эвтрофикации. В связи с этим существует необходимость периодической очистки их дна. В статье приведена оценка мощности и качества донных отложений Нижнезырянского водохранилища, расположенного в границах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Для оценки мощности сравнивались данные топосъемки первичного ложа и промеров современных глубин. Были смоделированы процессы сработки водохранилища и оценки распределения объемов донных отложений, а также было произведено зонирование дна по степени экологической опасности.

Key words: geoinformation modeling; Upper-Kama Potash-Magnesium Salt Deposit; bottom sediments thickness; ecological evaluation; water-storage reservoir drawdown.

Abstract: more than three fourth of water-storage reservoirs in the world have small volumes (less than 100 million m^3). Problems caused by siltation and eutrophication often occurs during economic use of such reservoirs. In this connection there is a need for periodic clearing their bottom. The article evaluates thickness and quality of the bottom sediments of the Nizhnezyriansk water-storage reservoir located within the Upper-Kama Potash-Magnesium Salt Deposit. To estimate the thickness the authors compared the topographic surveying data of the primary bed and measurements of the modern depths. Drawdown of the water-storage reservoir and estimation of the bottom sediments volumes distribution were modeled. And zoning the bottom by the ecological hazard degree was performed.

Рис. 1. Нижнезырянское водохранилище со стороны нижнего бьефа

Первые рукотворные водные объекты — водохранилища — созданы человеком свыше трех тысячелетий назад. В настоящее время они стали обычными элементами окружающей среды и необходимыми объектами хозяйственной деятельности. Большая часть водохранилищ (79%) относится к категории небольших и малых, имеющих полезный объем менее 100 млн м^3 [1]. Это весьма специфические природно-хозяйственные объекты, существенно выделяющиеся на фоне прочих как по хозяйственному предназначению, так и по природным особенностям. В отличие от крупных, часто оказывающих негативное воздействие на гидроклиматический режим регионов, малые водохранилища практически не влияют на прилегающие территории. Хозяйственное же значение их огромно, в первую очередь как источников водоснабжения, рыборазведения, рекреационной деятельности [3].

Малые водохранилища сравнительно быстро адаптируются в природной среде и начинают развиваться по ее естественным законам, не всегда в желательном с хозяйственной точки зрения направлении. Наиболее острой проблемой, осложняющей хозяйственное использование малых водохранилищ, является их заиливание с последующей эвтрофикацией и утратой экологического статуса. Данный процесс является следствием замедленного относи-

Рис. 2. Обезвоженный участок акватории Нижнезырянского водохранилища

Рис. 3. Снижение уровня воды в водохранилище привело к активации водно-эрозионной деятельности на осушенном участке

Таблица 1

Характеристика донных отложений зон экологической опасности в границах Нижнезырянского водохранилища и рекомендации по их использованию

Зона	Категория загрязнения, физико-химические показатели состояния грунтов [11]	Объем донных отложений, тыс. м^3	Рекомендации по использованию грунтов в соответствии с нормативными документами [5, 11]
I	Бактериологическое и химическое загрязнение не выявлено. Грунты супесчаные, pH>7,0	600	Для всех видов использования, в том числе для улучшения структуры и снижения кислотности тяжелых глинистых кислых почв
II	Бактериологическое загрязнение обусловлено распространением кишечной палочки, соответствует уровню «умеренно опасное»; индекс БГКП>100. Химическое загрязнение на уровне «умеренно опасного» по суммарной нагрузке — Zc>16, но <32. Грунты суглинистые, pH>7,0	2500	После дезинфекции допускается использование для засыпки котлованов и выемок на промышленно-урбанизированных территориях для создания зеленых зон с подсыпкой с поверхности слоя чистых почв мощностью не менее 0,2 м
III	Бактериологическое загрязнение отсутствует. Химическое загрязнение на уровне «опасного» — Zc>32; токсичность грунтов 3. Грунты легкосуглинистые, pH>7,0	280	Использование под отсыпку котлованов, выемок при строительных работах и благоустройстве на территориях озеленения с перекрытием слоем почв мощностью не менее 0,5 м
IV	Бактериологическое загрязнение: гельминты, кишечная палочка, широкий лентец (соответствует уровню «опасное»). Индекс БГКП>100. Химическое загрязнение на уровне «опасного» — Zc>32; токсичность грунтов 3. Грунты супесчаные, pH>7,0	120	Вывоз с утилизацией на спецполигонах или захоронение после обязательной дезинфекции

тельно питающих водохранилище речных водотоков водообмена в чаше водохранилища и ведет к накоплению донных отложений, поэтому малые водохранилища нуждаются в периодической очистке.

Несколько десятилетий назад проблема решалась достаточно просто и даже с определенным экономическим эффектом. Донные отложения из-за их повышенной органотрофности использовались в качестве удобрений для повышения продуктивности сельхозугодий [10]. В настоящее время их использование для этих целей осложнено необходимостью оценки их экологического состояния на предмет соответствия илов санитарным нормам [8]. Поэтому извле-

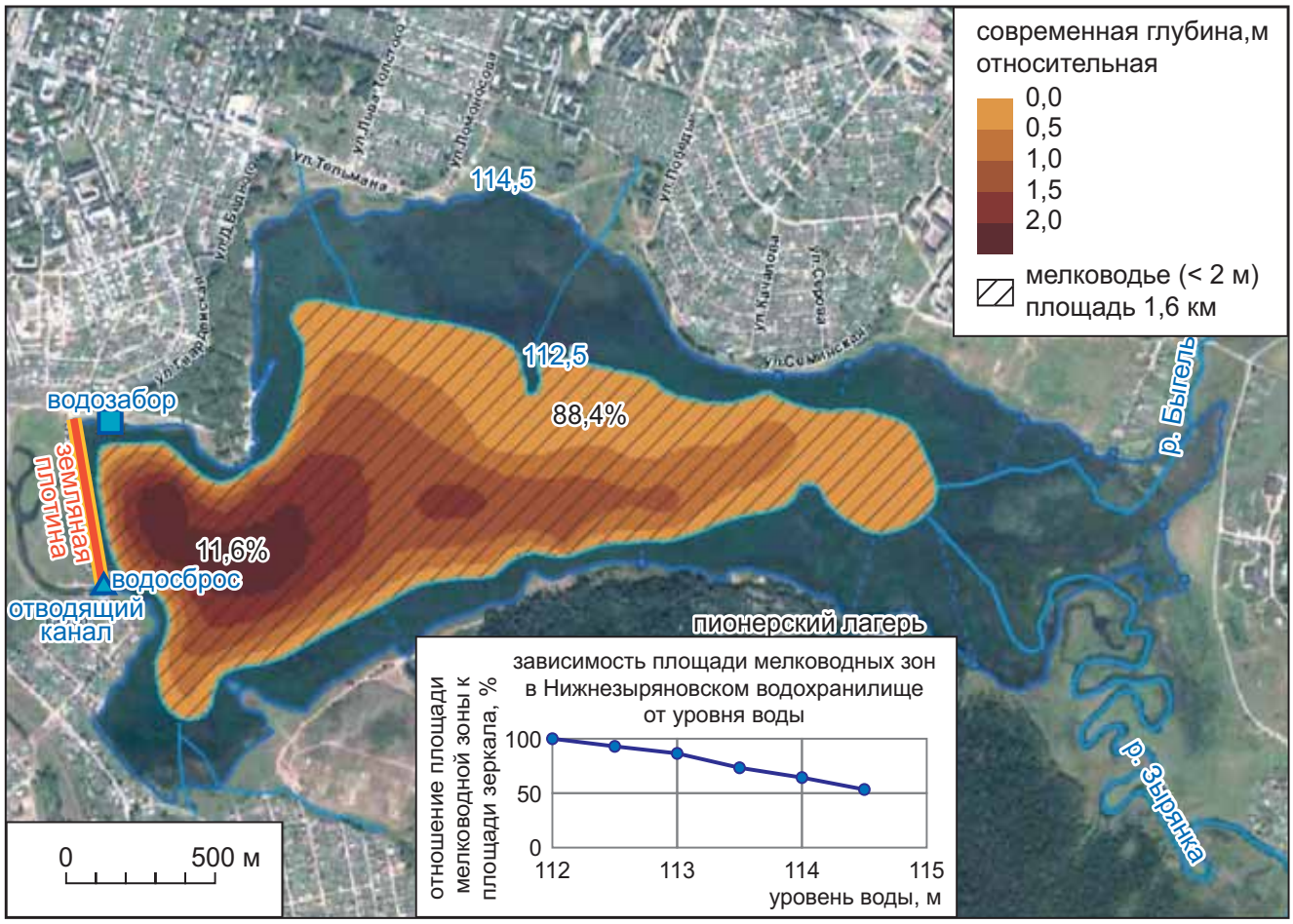


Рис. 4. Формирование мелководий после частичного осушения водохранилища

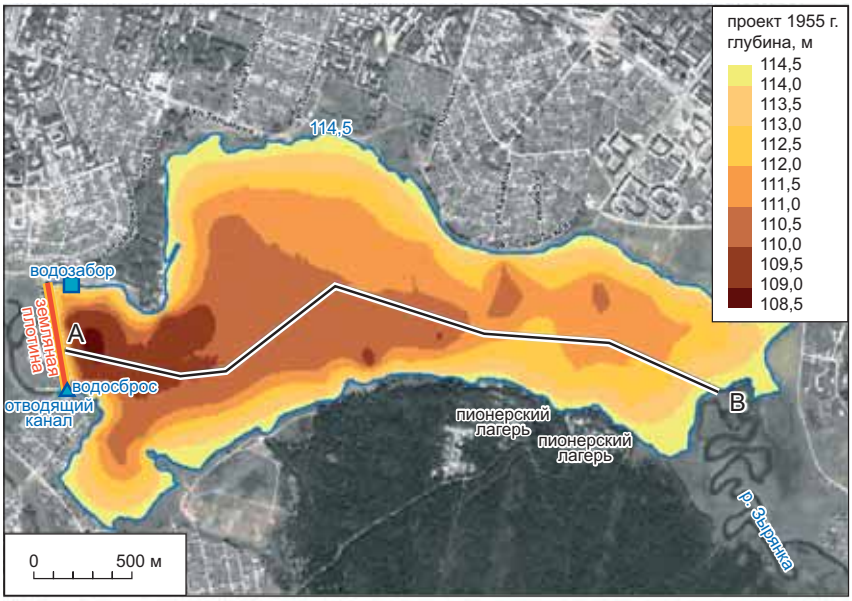
ченные отложения обычно складируются в гидроотвалы, занимающие большие площади и требующие дополнительных затрат на рекультивацию. Для оптимизации процесса требуется дифференцированный подход к расчету объемов накопленных донных отложений с оценкой их качества [15] и возможностей хозяйственного использования.

Особую остроту данные вопросы имеют в старых горнопромышленных регионах (таких как Пермский край), типичной чертой которых является большое количество малых водохранилищ, созданных для промышленных и хозяйственно-бытовых целей. В Пермском крае насчитывается около 1400 рукотворных водоемов, созданных для хозяйственных целей. Многие из них эксплуатируются с XIX века и требуют безотлагательной экологической реабилитации [2], неизбежным результатом которой будет образование громадного объема донных отложений. Так, принятие в 2009 году решения об очистке одного из старейших в крае 250-летнего Нытвенского водохранилища показало, что только для этого небольшого по размеру водоема объем подлежащих извлечению илов составит не менее 7,4 млн м^3. Вопрос об их утилизации пока не решен. Совершенно очевидно, что рациональное решение может быть принято только после дифференцированной оценки качества накопленных отложений с учетом их территориального размещения и мощности.

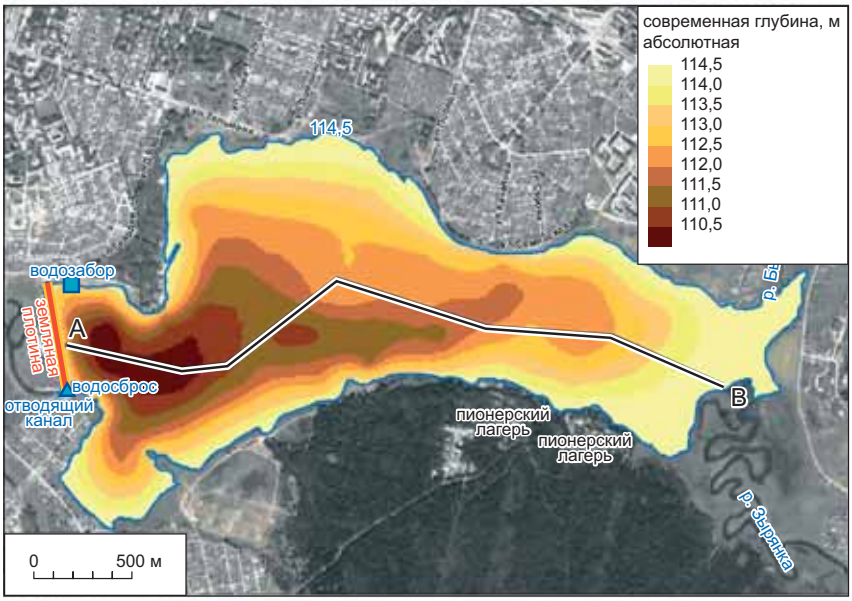
Опыт такой оценки имел место при решении проблемы снижения уровня Нижнезырянского водохранилища, расположенного в границах Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (над выработанным пространством соляных шахт) в непосредственной близости от крупного промышленного центра Пермского края города Березники. Аварийная ситуация привела к затоплению одного из рудников и образованию крупного провала в промышленной части города в непосредственной близости от водохранилища, создавая реальную угрозу для его существования (рис. 1). Во избежание катастрофических процессов было начато снижение его уровня, а в перспективе был поставлен вопрос о его полном спуске. В этой связи возникла необходимость в сжатые сроки оценить экологические последствия ликвидации данного водоема [6, 7, 12].

Нижнезырянское водохранилище было создано в 1954–1956 годах для водоснабжения активно растущего промышленного центра — г. Березники.

Цифровая модель рельефа дна по проекту 1955 г.



Цифровая модель рельефа дна по данным полевых работ



Современная мощность донных отложений, м

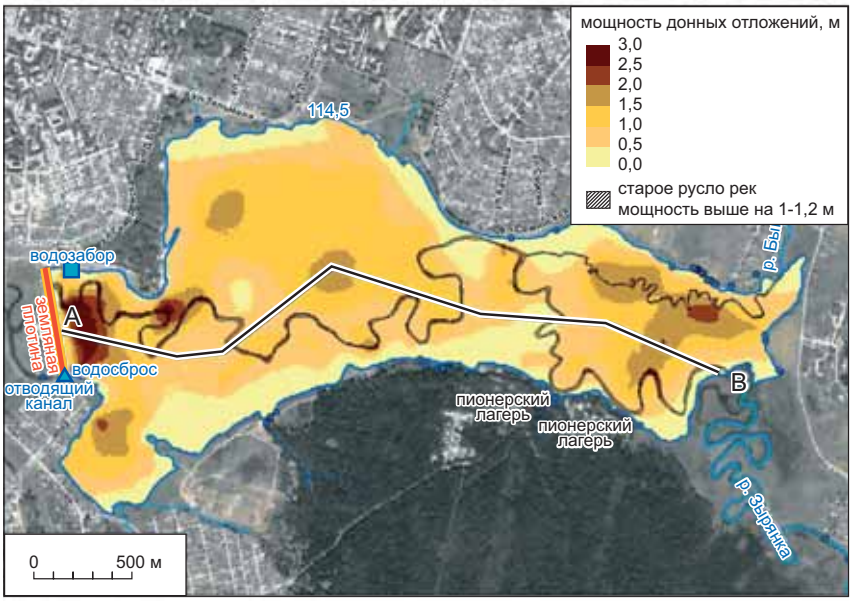


Рис. 5. Расчет мощности донных отложений Нижнезырянского водохранилища

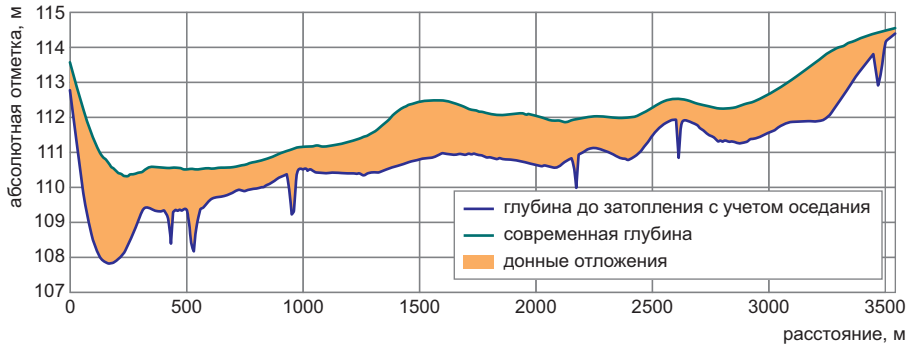


Рис. 6. Продольный профиль дна Нижнезырянского водохранилища по линии А-В

За полувековой период существования искусственно созданный водоем вписался в естественный ландшафт, став главной достопримечательностью зеленой зоны города и местом отдыха населения. У водохранилища выработался «профиль равновесия», сформировалась прибрежная отмель, стабилизировался уровень вод. Площадь водного зеркала в сложившемся стабильном состоянии при нормальном подпоре с абсолютной отметкой поверхности 114,5 м составила 3,65 км^2, объем водной массы — 6,9 млн м^3. Данных об объеме донных отложений в акватории водохранилища на период аварийной ситуации не было, но именно от них — потенциального источника вторичного загрязнения природной среды — ожидались наиболее неблагоприятные экологические последствия, ставшие очевидными после осушения верхней части акватории (рис. 2).

Негативные экологические последствия понижения уровня воды в водохранилище с частичным обнажением его днища проявились очень быстро, в течение нескольких недель. Этому способствовала высокая температура воздуха (водосброс производился в летний период). Обсыхающие донные отложения стали источником распространения резкого гнилостного запаха, появления большого количества синантропных насекомых – разносчиков инфекций. Последовавшее за снижением уровня воды изменение местного базиса эрозии для питающих водохранилище водотоков привело к активизации поверхностных водно-эрозионных процессов, нарушающих орографическую стабильность на значительной площади. Данная тенденция проявилась на обезвоженных участках практически сразу (рис. 3).

Подсыхая, донные отложения стали источником пыли, загрязняющей санитарно-защитную зону пруда и прилегающую урбанизированную территорию. Первичный анализ гранулометрического состава иловых масс позволил оценить пылевой потенциал осушаемой акватории в 40 тыс. т. Поскольку донные отложения формировались в условиях промышленной нагрузки, образовавшаяся пыль насыщена загрязняющими ингредиентами, в том числе тяжелыми металлами. В силу сложившейся розы ветров, их скорости и повторяемости наиболее высокая прогнозируемая нагрузка ожидается на северном побережье водохранилища с расположенной на нем селитебной зоной.

Резкое ухудшение экологической ситуации потребовало ускоренного расчета объемов и качества накопленных донных отложений для принятия решения об их утилизации. Постановка данной задачи осложнилась местными особенностями илонакопления. Значительная часть ложа водохранилища сложена 3–8-метровой толщей торфа, что существенно увеличило, несмотря на относительную молодость водоема, общую мощность иловых отложений и затруднило ее определение обычными дистанционными методами с использованием эхолота, георадара или профилографа. Поэтому был применен новый подход к пространственному цифровому моделированию. Его реализация оказалась возможной благодаря сохранившимся данным топогеодезической съемки первичного ложа водохранилища, которые позволили с высокой точностью оценить уровень нижней границы залегания донных отложений (использовались данные о рельефе дна до затопления водохранилища с учетом снижения отметок ложа по данным изолинейных карт оседания поверхности вследствие разработки месторождения). Верхняя граница была определена путем натурного промера современных глубин.

Для расчета мощности осушаемых донных отложений было выполнено моделирование процесса сработки водоема. Основой для решения задач, связанных с этим процессом и с определением мощности отложений, стало построение цифровой модели рельефа (ЦМР) современного дна Нижнезырянского водохранилища. В качестве исходных данных для этого были взяты результаты специально выполненной батиметрической съемки.

Главная проблема пространственного моделирования в ГИС — это построение наиболее адекватной из возможных поверхностей на основе существующих опорных точек. Для ее решения необходимо выбрать метод интерполяции исходных данных, учитывающий тематическую особенность поставленной задачи. Поэтому был проведен анализ использования детерминированных и геостатистических методов интерполяции [4, 9, 13, 14]. Для поиска оптимальной ЦМР был использован метод сравнения. При сравнении полученных моделей с оптимизированными параметрами было выявлено, что наилучшим образом исходную поверхность рельефа дна водо-

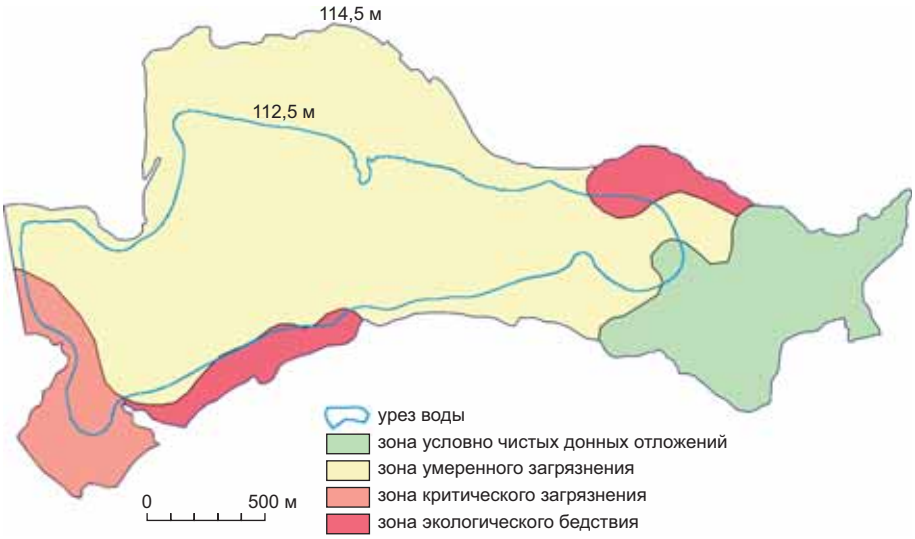


Рис. 7. Зонирование акватории водохранилища по степени экологической опасности

хранилища интерполирует метод ординарного кригинга. Полученная при этом модель учитывает как детерминированный тренд в рельефе дна, описываемый локальными полиномами 3-й степени, так и локальные вариации рельефа. Модель имеет наименьшую среднеквадратичную ошибку при перекрестной проверке и минимальные средние ошибки кригинга.

На основе этой модели были разработаны алгоритмы моделирования процесса сработки Нижнезырянского водохранилища (рис. 4) и оценки пространственного распределения объемов донных отложений с учетом первичного рельефа днища водоема и оседания его части над выработанным пространством шахт (рис. 5, 6).

Модель пространственного распределения донных отложений легла в основу выбора точек отбора проб для оценки экологического состояния отложений. Выбор оценочных показателей, включающий санитарно-гигиенические и физико-химические характеристики, был произведен в соответствии с нормативно-законодательными документами, регулирующими возможность использования природно-техногенных отложений для хозяйственных целей [5, 11–15]. Выявленная в результате исследования неоднородность условий залегания, мощности и качества донных отложений позволила провести зонирование водохранилища по степени их экологической опасности (рис. 7, табл. 1).

Всего было выделено четыре зоны, донные отложения которых существенно различаются по химическим и санитарно-гигиеническим показателям. Наиболее благополучна в экологическом отношении ***зона I***. Формирование донных отложений в ее границах происходило с наименьшим уровнем антропогенной нагрузки, поскольку в территориальном плане эта часть водохранилища находится выше по течению от водослива с городских объектов. Была выявлена токсичность отложений на уровне низкой [11], санитарно-гигиенические показатели оказались в норме, бактериологического загрязнения установлено не было. Благоприятны были и агрохимические показатели. Грунты этой зоны по сравнению с другими участками водохранилища характеризуются наибольшей обеспеченностью органическим веществом (5–8%) и подвижными формами биогенных элементов, а также слабощелочным pH. Значительный объем накопленных в данной зоне донных отложений (600 тыс. м^3) и показатели их экологического состояния позволяют рекомендовать их использование в агрохозяйственных целях для улучшения структуры, повышения плодородия и снижения кислотности тяжелых глинистых кислых почв, широко развитых в рассматриваемом регионе.

В ***зоне II*** имеет место бактериологическое и химическое загрязнение донных отложений, обусловленное распространением кишечной палочки в сочетании с химическим загрязнением. Оба вида загрязнения, оцененные в совокупности, соответствуют уровню «умеренно опасное» [11], поэтому экологическое состояние данного ареала в соответствии с оценочными критериями может рассматриваться как относительно удовлетворительное. Грунты с умеренно опасным загрязнением характеризуются средней токсичностью по геоинформационной оценке и имеют объем 2500 тыс. м^3. По действующим нормативам после дезинфекции допускается их использование для засыпки котлованов и выемок на промышленно-урбанизированных территориях для создания зеленых зон с подсыпкой с поверхности слоя чистых почв мощностью не менее 0,2 м [11]. В случаях, когда дезинфекция невоз-

EAGE
EUROPEAN ASSOCIATION OF GEOSCIENTISTS & ENGINEERS

Демонстрация геофизической аппаратуры и методик:

Приглашаем разработчиков оборудования и авторов новых методик в области инженерной геофизики продемонстрировать собственные разработки и аппаратуру на экспериментальном полигоне. Полученные результаты вы сможете показать и сравнить на конференции в рамках «круглого стола»

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА-2011
Конференция и Выставка

25-29 апреля 2011 г.
Россия, г. Москва
гостиница «Салют»

В рамках мероприятия состоятся:

Научно-практическая конференция
Курсы лекций по актуальным вопросам
Коммерческие презентации
Выставка
Экскурсия
Книжная ярмарка

Окончание приема тезисов докладов 1 марта 2011 г.

Контактная информация
EAGE Moscow Office
Tel.: +7 495 6619285
Fax: +7 495 6619286
E-mail: eg@eage.ru

www.eage.ru

можна, весь объем отложений подлежит захоронению.

Зона III выделяется в границах изучаемого объекта отсутствием бактериологического загрязнения, но имеет высокий уровень химического загрязнения, в связи с чем донные отложения не могут использоваться для агрохозяйственных целей. Показатель суммарного загрязнения *Zc* достигает здесь значений, соответствующих градации «опасный уровень загрязнения» [5, 11], в связи с насыщенностью илов тяжелыми металлами I класса экологической опасности. Индекс токсичности грунтов достигает 3 единиц. Согласно санитарно-гигиеническим нормативам такие отложения могут использоваться в промышленных целях для засыпки котлованов, выемок при строительных работах и благоустройстве. Весьма ограниченно допускается использование их на территориях городского озеленения с перекрытием слоем почв мощностью не менее 0,5 м.

Наиболее неблагополучна экологическая ситуация в ***зоне IV***, представленной двумя участками — северным и юго-западным (рис. 7). Донные отложения первого (северного) участка формируются под влиянием стоков с городской территории и расположенных на ней промышленных объектов. Они насыщены техногенными включениями, выделяются на общем фоне высоким содержанием органического вещества. Экологические показатели качества илов юго-западного участка зоны IV являются следствием ее размещения в нижнем бьефе водохранилища с наиболее застойным водным режимом и наибольшей мощностью отложений. Оба вида загрязнения — химическое и микробиологическое — в границах данной зоны соответствуют уровню «опасное». Повышенная опасность загрязнения является следствием высокого содержания в донных отложениях химических элементов I класса экологической опасности — цинка, свинца, кадмия (свыше 10 ПДК). Значение показателя *Zc* достигает 72 единиц. На фоне химического загрязнения высок уровень санитарно-эпидемиологического неблагополучия. Здесь выявлено наличие кишечной палочки, широкого лентеца, гельминтов. Нормативно предусмотренные мероприятия ограничивают хозяйственное использование таких грунтов их обязательной дезинфекцией с последующим вывозом и захоронением на специально предназначенных для этих целей полигонах.

Таким образом, из общей массы донных отложений, подлежащих извлечению и последующей утилизации (3,5 млн т), реальную экологическую опасность, из которой вытекает невозможность их хозяйственного использования, имеют всего 120 тыс. т. Данный объем сконцентрирован в границах IV экологической зоны и подлежит захоронению после его извлечения. Донные отложения прочих экологических зон могут быть использованы для хозяйственных целей, предусмотренных нормативными документами [11].

Заключение

Результаты исследования показали, что сочетание методов геоинформационного моделирования пространственных особенностей распределения донных отложений малых водохранилищ с оценкой их экологического состояния позволяет оптимизировать процесс утилизации донных отложений при необходимости дноуглубительных работ и очистке водных объектов от заиления. Учитывая широкое распространение малых водохранилищ, необходимость периодической очистки которых от продуктов аккумуляции приводит к значительному увеличению объема отходов, нуждающихся в захоронении, использованный методический подход при проведении инженерно-гидрогеологических и инженерно-экологических изысканий может служить основой для принятия экономически эффективных дифференцированных решений в экологическом проектировании.

Настоящая работа была подготовлена при поддержке гранта РФФИ 10-05-96017 р_урал_а «Теоретические основы создания искусственных геохимических барьеров для защиты окружающей среды при освоении природных ресурсов Западного Урала».

Список литературы

1. *Авякан А.В., Салсанкин В.П., Шарапов В.А.* Водохранилища. М.: Мысль, 1987. 325 с.
2. *Венецианов Е.В., Лепихин А.П.* Физико-химические основы моделирования миграции и трансформации тяжелых металлов в природных водах / под науч. ред. А.М. Черняева. Екатеринбург: Изд-во РосНИИВХ, ФГУП КамНИИВХ, 2002. 236 с.
3. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду / отв. ред. Г.В. Воропаев, А.Б. Авакян. М.: Наука, 1986. 367 с.
4. *Калинин В.Г., Назаров Н.Н., Пьянков С.В., Симиренов С.А., Тюняткин Д.Г.* Изучение оползневой деятельности на берегах Камского водохранилища с применением ГИС-технологий // Геоморфология. М.: Наука, 2004. Вып. 4. С. 55–62.
5. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. М.: ГКНТ Минприроды, 1992.
6. *Максимович Н.Г., Ворончихина Е.А., Китаева И.В., Шавнина Ю.Н.* Эколого-геохимические проблемы утилизации донных отложений Нижнезырянского водохранилища // Геохимия биосферы: сб. матер. и тез. IV междунар. совещания. Новороссийск, 2008. С. 143–145.
7. *Максимович Н.Г., Ворончихина Е.А., Китаева И.В., Шавнина Ю.Н.* Эколого-хозяйственная оценка условий морфолитогенеза днища Нижнезырянского водохранилища (Пермский край) // Инженерная геология, гидрогеология и геодинамика прибрежных территорий и ложа водохранилищ: матер. междунар. науч.-практ. конф. Пермь, 2008. С. 107–113.
8. *Попов А.Н., Гневашев М.Г., Сапрыкина А.Ю.* Натурные наблюдения за выносом загрязняющих веществ на спущенных прудах сельскохозяйственного использования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2004. Т. 6. № 3. С. 233.
9. *Пьянков С.В., Калинин В.Г.* К вопросу о точности выполнения картометрических работ традиционными способами и с применением ГИС-технологий // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Перм. ун-т, 2000. С. 50–54.
10. *Рэуце К., Кырстя С.* Борьба с загрязнением почвы. М.: Агропромиздат, 1986. 221 с.
11. СанПин 2.1.7.1287-03. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. Утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 16.04.2003 г. (с дополнениями от 25.04.2007 г.).
12. *Шавнина Ю.Н., Максимович Н.Г., Пьянков С.В.* Моделирование сработки водохранилища и расчет мощности донных отложений // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2007. № 10. С. 87–93.
13. ArcGIS Desktop Developer Guide ArcGIS 9.1. Published by ESRI 380 New York Street Redlands, California 92373-8100. 340 p.
14. ArcGIS 9 Geostatistical Analyst. Руководство пользователя. Published by ESRI 380 New York Street Redlands, California 92373-8100, Russian Translation by DATA+, Ltd. 277 p.
15. *Maximovich N.G., Menshikova E.A., Osovetskiy B.M.* Hard technogenic components in alluvium and environment // Proceedings of the 8th International Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, 21–25 Sept. 1998. Rotterdam, Brookfield, 2000. P. 4579–4582.