

УДК 550.4.08

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГУМУСНОСТИ ПРИРОДНОЙ ВОДЫ НА ОСНОВЕ ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Б. Зобков

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

В работе проведен анализ связи гумусности озер гумидной зоны, как одного из основных показателей качества воды, с морфометрическими особенностями их водосборной территории. Современные данные о строении водосборной территории исследованных озер получены с помощью геоинформационной системы (ГИС) путем обработки цифровой модели рельефа Земли (ЦМР), растровых топографических карт местности масштаба 1:100 000 и векторных карт. Обнаружена тесная связь между гумусностью воды и залесенностью водосборного бассейна. На ее основе построена модель, позволяющая выполнять прогнозирование гумусности воды по некоторым параметрам водосборных бассейнов озер. Параметры водосборных бассейнов определяются с помощью ГИС. Доверительный интервал прогнозируемого значения составил ± 6 ед. гумусности с вероятностью 0,95 при сезонном ее колебании ± 3 ед.

Ключевые слова: качество воды; гумусность; морфометрические характеристики; водосборный бассейн; ГИС; ЦМР.

M. B. Zobkov. PREDICTING THE HUMUS CONTENT OF NATURAL WATERS THROUGH GIS MODELLING

The paper investigates the relationship between water humus content and the catchment's morphometry. Contemporary watershed data were obtained by digital elevation model (DEM) processing, from 1:100 000 raster topographic maps and vector maps with the aid of geographical informational system (GIS) software. Strong correlation was found to exist between water humus content in lakes and forest coverage of the catchment. On the basis of this relation a model was developed which allows predicting the humus content of lakes relying on some of their watershed characteristics determined with the help of GIS tools. The confidence interval for this prognosis was ± 6 units of humus content ($\alpha = 0.95$), while its seasonal variation was ± 3 units ($\alpha = 0.95$).

Keywords: water quality; humus content; morphometric characteristics; catchment area; GIS; DEM.

Введение

Одним из основных компонентов поверхностных вод гумидной зоны является органическое вещество (ОВ), которое не только в значительной степени определяет их специфику,

но и сказывается на количестве и миграции других компонентов (биогенных элементов, Fe, Mn и др.), а также влияет на газовый режим и pH воды. Для ОВ природных вод характерна очень высокая вариабельность как косвенных характеристик его содержания (перманганатная

окисляемость (ПО), химическое потребление кислорода (ХПК), цветность (ЦВ)), так и концентрации органического углерода ($C_{орг}$). Поскольку перечисленные косвенные характеристики отражают содержание ОВ в воде, наблюдается высокая степень корреляции между ними [Лозовик, 2006]. Для комплексной характеристики содержания ОВ в воде был введен показатель ее гумусности [Лозовик, 2006], который определяется как среднее геометрическое цветности воды и перманганатной окисляемости:

$$Hum = \sqrt{ЦВ \cdot ПО}.$$

Поскольку количество водных объектов в гумидной зоне очень велико, то для их комплексного изучения требуется разработка методов дистанционной оценки природного качества воды и ее прогнозирование на основе картографической информации и данных дистанционного зондирования Земли.

Для изучения связей между химическими показателями воды и характеристиками водосборной территории требуется, во-первых, получить репрезентативную выборку объектов, наиболее широко отражающих диапазон изменения изучаемых величин, а во-вторых, минимизировать внешнее влияние, не учитываемое в рассматриваемой модели, в частности, антропогенное загрязнение. Поскольку территория Республики Карелия характеризуется высокой плотностью озерно-речных систем и малой хозяйственной освоенностью, а доля загрязненных водных объектов здесь сравнительно мала [Зобков, 2012], это позволяет сформировать конечный список водных объектов, наиболее полно отражающих спектр изменения как химического состава воды, так и особенностей морфометрического строения их водосборной территории.

Работы в этом направлении предпринимали Jan-Olov Andersson и Lars Nyberg [2008, 2009]. Ими исследовалось влияние характеристик водосборной территории на содержание растворенного органического углерода и других химических показателей качества воды в водотоках. Авторам удалось получить высокие корреляции некоторых из этих показателей для водосборов площадью от 1,5 до 4 км² [Andersson, Nyberg, 2009], в то время как для меньших водосборов (от 0,5 до 1,5 км² [Andersson, Nyberg, 2008]) значимых связей найти не удалось. Потенциально отсутствие значимых связей для малых водосборов может быть обусловлено высокой сезонной изменчивостью химического состава воды малых водотоков, на которых проводились измерения.

В данном исследовании в качестве объектов изучения были выбраны озера, поскольку они являются более инертными системами, нежели водотоки, что способствует более плавным изменениям в химическом составе их вод и позволяет получить репрезентативные результаты при сезонном графике отбора проб. Критерий выбора объектов исследования также принципиально отличался от подхода шведских ученых. Вместо классификации водных объектов по площади водосбора, имевшей место у Andersson и Nyberg, нами объекты выбирались по химическим показателям качества их воды.

Материалы и методы

Число озер, расположенных на территории Республики Карелия, по разным подсчетам, достигает 60 000, и каждое из них в своем роде индивидуально по химическому составу воды. Поэтому выбор ограниченного числа водных объектов, в полной мере отражающих их природное разнообразие, является нетривиальной научной задачей. Объекты выбирались с учетом многих факторов, таких как степень антропогенного влияния, доступность, удобство для проведения полевых исследований и др. Однако основным требованием являлось максимальное отражение всего разнообразия химических типов поверхностных вод региона в конечной выборке доступных для обследования водных объектов.

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН ведет наблюдение за водными объектами Республики Карелия с 1946 года. За это время накоплен огромный массив информации, хранящийся как на бумажных, так и на электронных носителях. Составленная по этим материалам база гидрохимических данных включает в себя общую информацию о водном объекте, химические и физико-химические показатели качества воды: электропроводность, температуру, содержание взвешенных веществ, прозрачность, ионный состав (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^-), щелочность, цветность, ПО, ХПК, БПК₅, БПК₂₀, хлорофилл *a*, содержание органического углерода, биогенных ($N_{орг}$, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , $P_{взвеш}$, $P_{мин}$, $P_{общ}$) и литофильных (Si, Fe (II), $Fe_{общ}$, $Fe_{взвеш}$, Mn, Al) элементов, фторидов, концентрацию кислорода и CO₂, pH воды, а также информацию о загрязняющих веществах: тяжелых металлах (Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Li, Cr), нефтепродуктах, лигносульфонатах, фенолах и др. В базе данных содержится информация о химическом составе воды 522 озер. Однако, поскольку информация, входящая в эту базу, была получена в различные по водности

Таблица 1. Гумусность воды (усл. ед.) группы модельных озер в различные сезоны года

Название озера	Кадастровый №	Весна	Лето	Осень	Зима
Салонъярви	1639	55	47	79	68
Вегарус	1645	48	39	52	42
Крошнозеро	1695	30	27	24	34
Святозеро	1728	12	16	9	9
Урозеро	1750	3	3	6	3
Урос	1803	6	6	7	4
Вендюрское	1804	15	13	13	9
Яндомозеро	1858	10	13	27	12

годы и в различные гидрологические сезоны, непосредственное ее применение для достижения поставленных в настоящей работе целей представляется затруднительным. Поэтому указанная база данных использовалась нами для предварительного выбора объектов исследования.

Исходные данные были обработаны с помощью программы для ЭВМ Автоматизированная информационная система «Обработка гидрохимической информации и оценка состояния водных объектов» [Зобков, 2010], в результате чего проведена геохимическая классификация всех занесенных в базу озер по щелочности, гумусности и уровню трофии [Лозовик, 2013].

Геохимическая классификация вод предсказывает существование 67 комбинаций щелочности, гумусности и уровня трофии, которые для достижения поставленных целей были укрупнены до 31 варианта путем объединения редко встречающихся классов высокощелочностных высокогумусных вод и кислых низкогумусных. Некоторые из выделенных классов, такие как высокощелочностные, слабощелочные мезополигумусные или низкощелочностные кислые ультраолигогумусные, ввиду их специфичности в имеющейся базе данных представлены не были. Поэтому итоговый список геохимических классов содержал 24 их комбинации.

Основным критерием отбора озер для включения в программу исследований было то, что водный объект должен наиболее точно характеризовать каждый из геохимических классов. Для выполнения этого требования был разработан следующий интегральный критерий оценки. На первом этапе проводилось ранжирование озер путем определения расстояния, характеризующего отдаление каждого озера от реперной точки класса, к которому оно отнесено на двумерной координатной плоскости классифицируемых параметров: $pH-Alk$, $Hum-Fe_{общ}$, класс гумусности – $P_{общ}$, для каждого из геохимических типов вод соответственно:

щелочности, гумусности и уровня трофии. Далее была проведена нормировка этого расстояния на его максимальное значение в каждом классе для получения возможности сравнивать эти показатели. В качестве основного критерия для включения водных объектов в программу исследования было выбрано среднее арифметическое нормированных расстояний для всех трех геохимических классов. Озера, у которых этот показатель был минимальным, отбирались для дальнейшей работы. Для каждого укрупненного класса было отобрано от одного до четырех озер. На этом этапе список состоял из 45 водных объектов.

С учетом разработанных требований выбрано 23 озера, максимально отличающихся по щелочности, гумусности и уровню трофии. На них был проведен отбор проб в летний период 2011 г. Для сезонных исследований в 2012 г., в связи со значительным увеличением числа проб, список водных объектов был сокращен до восьми. Для сохранения полноты выборки при отборе этих водных объектов использовались данные химического анализа проб воды, полученные летом 2011 г. Водные объекты, на которых проводились сезонные измерения, вошли в модельную группу озер, а водоемы, где пробы отбирались только в летний период, – в тестовую. Позже тестовая группа была дополнена еще двумя водными объектами, отбор проб на которых проводился в тот же период. Данные по гумусности воды обследованных озер приведены в таблицах 1 и 2. Все исследованные озера (рис. 1) и их водосборные бассейны расположены в центральной части Карелии, в районе прямоугольной формы, имеющей протяженность с севера на юг 200 км, с запада на восток 150 км и координаты центра $62^{\circ}07'23''$ с. ш., $33^{\circ}29'27''$ в. д.

Основным источником данных о строении водосборной территории являлась цифровая модель рельефа (ЦМР), построенная методом дистанционного зондирования Земли с разрешением 90 м [USGS..., 2015], существенно

Таблица 2. Основные характеристики водосборной территории и гумусность группы тестовых водных объектов

Название озера	Кадастровый №	Средняя глубина, м	S_{wh} , км ²	S_{mash} , км ²	S_{wat} , км ²	Hum
Лугляярви	1660	1,5	142	18	15	34
Ягляярви	1661	3	95	12	11	32
Иля-Кялькянярви	1665	1,5	18	3	2	54
Кивач	1700	1,7	85	11	7	52
Палват	1704	1	106	15	8	54
Н. Ротчозеро	1721	2,5	25	5	4	33
Кутиж-озеро	1735	2	124	20	6	98
Мунозеро	1741	14,4	63	5	17	4
Сандал	1831	9,7	6779	995	948	21
Габозеро	1833	1,5	12	5	3	21
Чучъярви	-	4	7	1	1	7
Леликозеро	-	2	7	0	2	6
Коверъярви	-	3	9	1	2	34
Падмозеро	1859	4	101	17	12	16
Салонъярви	1639	3,9	1838	291	182	37
Валгомозеро	1863	8,8	13	0	4	5
Лижемское	1730	6,8	14	0,1	5	9

Примечание. S_{wh} – площадь водосборной территории, S_{mash} – площадь всех болот на водосборной территории, S_{wat} – площадь всех водных объектов на водосборе.

дополненная и доработанная [Ferranti, 2014], а также растровые топографические карты местности масштаба 1:100 000 и векторные карты, оцифрованные с топографических масштаба 1:200 000. Обработка картографического материала проводилась с помощью ГИС ESRI ArcGIS с пакетом Spatial Analysis, что позволило установить такие морфометрические характеристики водосбора, как его площадь и средний уклон (табл. 2, 3). Верификация контуров водосборных бассейнов проводилась на основе топографической карты масштаба 1:100 000. Площадь, занимаемая болотами и озерами на каждом из водосборных бассейнов, была определена с использованием векторных слоев, оцифрованных с карты масштаба 1:200 000.

Результаты и обсуждение

Большинство исследователей, занимавшихся вопросами влияния водосборной территории на содержание органического вещества в воде, отталкивались от предположения, что основной вклад в содержание аллохтонного органического вещества оказывают болота, сток которых отличается высокими значениями ЦВ и ПО и, соответственно, гумусностью. Однако по нашим данным значимой корреляции между коэффициентом заболоченности водосбора и гумусностью не наблюдалось ($R^2 = 0,21$). В связи с этим было выполнено отступление от общепринятого представления и проведен

поиск корреляционных зависимостей для других факторов, которые могли бы повлиять на гумусность воды. В частности, рассматривались такие характеристики, как средний уклон водосбора, средний уклон его негоризонтальной поверхности (водосборной территории за вычетом площадей болот и озер), отношение площади всех болот на водосборе к площади всех озер и к объему воды в исследованных озерах (на основании расчетных данных о площади и справочных данных о средней глубине), а также их различные комбинации. Большинство из них не показали значимых корреляций.

Наибольший коэффициент корреляции ($R^2 = 0,83$) был получен для следующей комбинации характеристик водосбора:

$$S_f = \frac{S_{wat}}{S_{wh} - S_{wat} - S_{mash}},$$

где S_{wat} – площадь всех водных объектов на водосборе, S_{wh} – площадь водосборной территории, S_{mash} – площадь всех болот на водосборной территории. Если внимательно рассмотреть данную формулу и учесть, что площадь поселений и сельхозугодий на рассматриваемых водосборах пренебрежимо мала, можно принять, что знаменатель является не чем иным, как площадью территории водосбора, покрытой лесом. Таким образом, коэффициент S_f будет выражать отношение площади водных объектов, находящихся на водосборе рассматриваемого озера, к площади лесов. Как видно

Таблица 3. Основные характеристики водосборной территории группы модельных водных объектов

Название озера	Средняя глубина	Площадь водосбора, км ²	Площадь болот, км ²	Площадь озер, км ²
Салонъярви	3,9	1838	291	182
Вегарус	4,4	160	32	17
Крошнозеро	5,7	191	4	25
Святозеро	6,8	51	0,7	13
Урозеро	12	21	0,8	14
Урос	2,9	7	0,4	4
Вендюрское	6,1	93	14	23
Яндомозеро	4,3	113	15	33

из рисунка 2, зависимость гумусности от показателя S_f может быть хорошо аппроксимирована степенной зависимостью с показателем степени $-0,794$.

Учитывая это, можно предположить, что болота выполняют лишь роль аккумуляторов органического вещества, в то время как его основным источником являются участки водосбора, покрытые лесом. Данное предположение выглядит логичным и с точки зрения общей биологической продуктивности болот и лесов – для последних она на порядок больше. Вместе с тем малая площадь озер на водосборе способствует быстрому выносу OB с его территории, в то время как на водосборах

с большой озерностью происходит его частичная ассимиляция.

Полученная зависимость была проверена на группе модельных водных объектов. Результаты расчета приведены в таблице 4. Как видно из таблицы, наибольшее отклонение расчетного показателя гумусности от наблюдаемого составило около 25 ед. для высокогумусного озера Кутиж-озеро, в то время как относительная погрешность была наибольшей для низкогумусных водных объектов: для них расчетные значения превышали наблюдаемые максимум в 2,5 раза. Вместе с тем дисперсия в разности прогнозируемых и измеренных значений гумусности составила 10 единиц, что можно считать хорошим

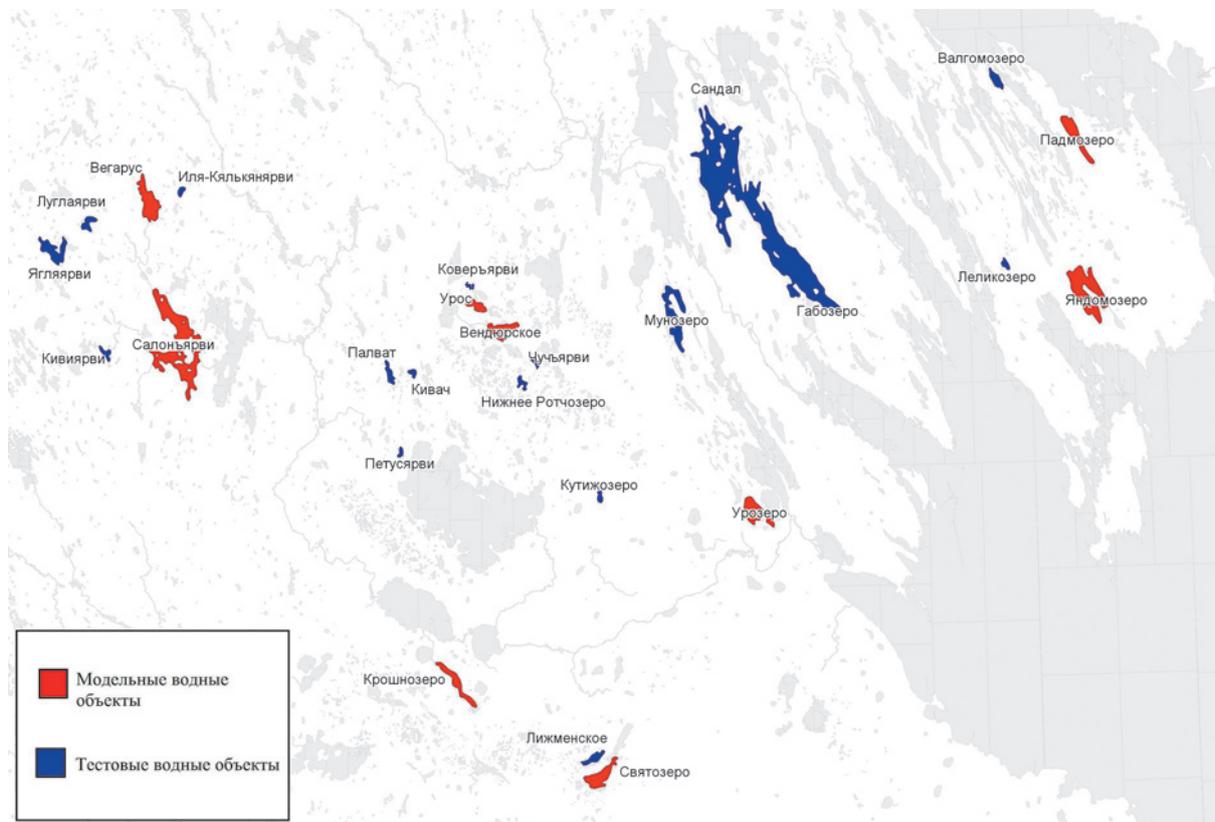


Рис. 1. Расположение исследованных озер

Таблица 4. Сравнение реальных значений гумусности воды с расчетными для тестовой группы озер

Название озера	Sf	Hum расч.	Hum набл.	Абсолютное отклонение Hum, ед.	Относительное отклонение Hum, %
Салонъярви	0,13	38	37	-1	1
Яглярви	0,16	32	31	-1	3
Палват	0,09	51	54	+3	6
Кивач	0,10	48	52	+4	8
Луглярви	0,13	38	34	-4	9
Иля-Кялякянярви	0,12	41	54	+13	24
Кутиж-озеро	0,06	72	98	+26	26
Н. Ротчозеро	0,23	24	33	+9	27
Коверъярви	0,23	24	34	+10	28
Сандал	0,20	28	21	-7	34
Крошнозеро	0,15	34	24	-10	41
Лижемское	0,49	13	9	-4	57
Габозеро	0,85	9	21	+12	58
Падмозеро	0,16	33	16	-17	110
Чучьярви	0,30	20	7	-13	175
Леликозеро	0,30	20	6	-14	207
Валгомозеро	0,47	14	5	-9	209
Мунозеро	0,42	15	4	-11	248

результатом. Также необходимо учесть, что данная зависимость получена для сезонных наблюдений и отображает среднее значение гумусности за сезон, в то время как на группе тестовых озер отбор проб осуществлялся только в летний гидрологический сезон, в который, как правило, содержание растворенного органического вещества в воде несколько ниже. Доверительный интервал прогноза гумусности воды при вероятности 0,95 находится в пределах $D_{Hum} = \pm 6$, при этом доверительный интервал при непосредственном определении гумусности с учетом сезонного ее колебания составляет $D_{Hum} = \pm 3$ ед.

(при вероятности 0,95, вычислено для группы модельных объектов).

Таким образом, можно заключить, что предложенная нами модель работает и может быть применена при планировании экспедиций, рекогносцировочных и других исследований, где полученная величина погрешности является допустимой.

Выводы

Проведенный анализ гумусности озер Карелии и характеристик их водосборных

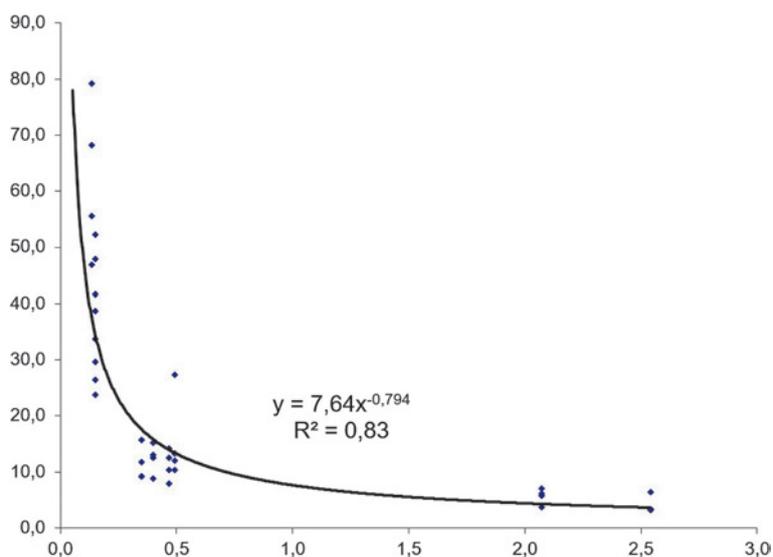


Рис. 2. Зависимость гумусности воды (Hum, ед.) от коэффициента Sf для модельной группы озер

бассейнов с использованием ГИС показал отсутствие ее связи с заболоченностью водосборов ($R^2=0,21$), но выявил значимую экспоненциальную зависимость ($R^2=0,83$) гумусности от отношения площадей всех водных объектов на водосборе к площади лесов. Такую закономерность можно объяснить тем, что ОВ преимущественно поступает с территорий, покрытых лесом, а в водных объектах происходит его частичная ассимиляция.

Установленная регрессионная зависимость была проверена на группе модельных водных объектов. Расхождение между спрогнозированными значениями и результатами прямых измерений гумусности в среднем не превышало 6 ед.

Для детального выяснения влияния леса на гумусность воды требуется проведение дальнейших исследований на большей выборке данных.

Автор благодарит сотрудников лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС Карельского научного центра РАН, принимавших участие в полевых выездах, обработке проб воды и формировании базы данных.

Литература

Зобков М. Б. Автоматизированная информационная система «Обработка гидрохимической

информации и оценка состояния водных объектов (АИС «ОГХИ»». А. с. РФ на программу для ЭВМ № 2010612351 // Бюл. РУ ОБПБТ, 2010. № 2 (71). С. 563.

Зобков М. Б. Методы обработки геоинформационных данных состояния водных объектов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.35. СПб., 2012. С. 68.

Лозовик П. А. Геохимическая классификация поверхностных вод гумидной зоны на основе их кислотно-основного равновесия // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 583–593. doi: 10.1134/S0097807813060067

Лозовик П. А. Гидрогеохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: дис. ... докт. хим. наук: 25.00.36. М., 2006. 481 с.

Andersson J. O., Nyberg L. Spatial variation of wetlands and flux of dissolved organic carbon in boreal headwater streams // Hydrological Processes. 2008. Vol. 22, no. 12. P. 1965–1975. doi: 10.1002/hyp. 6779

Andersson J. O., Nyberg L. Using official map data on topography, wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments // Hydrology and Earth System Sciences. 2009. Vol. 13, no. 4. P. 537–549. doi: 10.5194/hess-13-537-2009

Ferranti J. Viewfinder panoramas. 2014: Digital elevations data. [Электронный ресурс]. URL: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html> (дата обращения 01.02.2015).

USGS STRM DEM. 2015. [Электронный ресурс]. URL: <http://srtm.usgs.gov/> (дата обращения 01.02.2015).

Поступила в редакцию 11.02.2016

References

Zobkov M. B. Avtomatizirovannaja informacionnaja sistema "Obrabotka gidrohimicheskoj informacii i ocenka sostojanija vodnyh ob'ektov (AIS "OGHI)". A. s. RF na programmu dlja JeVM № 2010612351 [PC Automatic information system *Hydrochemical data processing and water objects condition assessment* (AIS OGHI). RF software certificate of authorship No. 2010612351]. *Bjul. RU OBПBТ* [Official Bulletin Software Programs. Data Bases. *Topology of Integrated Schemes* (OBПBТ)]. 2010. No. 2 (71). P. 563.

Zobkov M. B. Metody obrabotki geoinformacionnyh dannyh sostojanija vodnyh ob'ektov [Methods of geoinformational data processing of water objects]: Summary of PhD (Cand. of Tech.) thesis: 25.00.35. St. Petersburg, 2012. P. 68.

Lozovik P. A. Geochemical classification of surface waters in a humid zone based on their acid-base equilibrium. *Water Resources*. 2013. Vol. 40, no. 6. P. 631–639. doi: 10.1134/S0097807813060067

Lozovik P. A. Gidrogeohimicheskie kriterii sostojanija poverhnostnyh vod gumidnoj zony i ih ustojchivosti k antropogennomu vozdejstvu [Hydrogeochemical

criteria of surface waters in a humid zone and their tolerance to human impact]: DSc (Dr. of Chem.) thesis: 25.00.36. Moscow. 2006. 481 p.

Andersson J. O., Nyberg L. Spatial variation of wetlands and flux of dissolved organic carbon in boreal headwater streams. *Hydrological Processes*. 2008. Vol. 22, no. 12. P. 1965–1975. doi: 10.1002/hyp. 6779

Andersson J. O., Nyberg L. Using official map data on topography, wetlands and vegetation cover for prediction of stream water chemistry in boreal headwater catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009. Vol. 13, no. 4. P. 537–549. doi: 10.5194/hess-13-537-2009

Ferranti J. Viewfinder panoramas: Digital elevations data. 2014. URL: <http://viewfinderpanoramas.org/dem3.html> (accessed: 01.02.2015).

USGS STRM DEM. 2015. URL: <http://nationalmap.gov/elevation.html> (accessed: 01.02.2015).

Received February 11, 2016

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Зобков Михаил Борисович
научный сотрудник лаб. гидрохимии
и гидрогеологии, к. т. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185030
эл. почта: duet@onego.ru

CONTRIBUTOR:

Zobkov, Mikhail
Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: duet@onego.ru