

Исследование динамики площади озера Аслыкуль (Южное Предуралье) методом обработки изображений космических снимков на основе алгебраического подхода

© 2021. Б. И. Кочуров¹, д. г. н., профессор, в. н. с.,
Р. Ф. Маликов², д. ф.-м. н., профессор,
А. Р. Исхаков², к. ф.-м. н., доцент, Г. Т.-Г. Турикешев³, к. г. н., доцент,
А. Р. Усманова³, к. г. н., доцент, Е. Б. Кратынская⁴, аспирант,
¹Институт географии РАН,
119017, Россия, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29,
²Башкирский государственный педагогический университет им. М. Акмуллы,
450008, Россия, г. Уфа, ул. Октябрьской Революции, д. 3а,
³Башкирский государственный университет,
450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32,
⁴Московский государственный университет геодезии и картографии,
105064, Россия, г. Москва, Гороховский пер., д. 4,
e-mail: rfmalikov@mail.ru

В работе использовали данные дистанционного зондирования озера Аслыкуль, что потребовало проведения соответствующей обработки и особых технологий картографирования. Предложена математическая модель обработки изображений, основанная на численной оптимизации многопараметрической нелинейной функции с линейными ограничениями по отношению к эталону, который задаётся в начале обработки экспертом для выбранного изображения. В качестве изображения использовали данные космической съёмки озера Аслыкуль, полученные спутником Landsat-5 за 10 лет с 1987 г. Определены параметры измерительной функции системы технического зрения, которая проводит также численные измерения водного объекта. Проведено вычисление площади озера и сбор данных, которые обработаны алгебраическим и статистическим методами. Установлено периодическое изменение площади поверхности озера. Результаты исследования показали, что произошло увеличение площади озера на 2,5–3 км². Выдвинуто предположение, что одной из причин изменения площади озера является тектоническая активность.

Ключевые слова: площадь озера, обработка космических снимков, Landsat-5, система технического зрения, дистанционное измерение площади, модифицированные дескриптивные алгебры изображений.

The study of Lake Aslykul (Southern Cis-Ural) area dynamics by processing the satellite images on the basis of the algebraic approach

© 2021. B. I. Kochurov¹ ORCID: 0000-0002-8351-3658, R. F. Malikov² ORCID: 0000-0003-3457-0135,
A. R. Iskhakov² ORCID: 0000-0002-5443-9989, G. T.-G. Turikeshev³ ORCID: 0000-0001-5287-3581,
A. R. Usmanova³ ORCID: 0000-0001-8453-4226, E. B. Kratynskaya⁴ ORCID: 0000-0002-2770-3780,
¹Institute of Geography of Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetnyy Pereulok, Moscow, Russia, 119017,
²Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmullah,
3a, Oktyabr'skoy Revolyutsii St., Ufa, Russia, 450008,
³Bashkir State University,
32, Zaki Validi St., Ufa, Russia, 450076,
⁴Moscow State University of Geodesy and Cartography,
4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,
e-mail: rfmalikov@mail.ru

image at the beginning of processing. As the image, the satellite imagery data from Lake Aslykul, obtained by the Landsat-5 satellite during 10 years since 1987, are used. The parameters of the measuring function of the technical vision system, which are necessary for the numerical measurement of a water body, have been determined. The calculation of the area of the lake and the collection of data are carried out, which are processed by the algebraic and statistical methods. A periodic change in the surface area of the lake was established. The results of the study showed that the lake area increased by 2.5–3 km². We suggest that one of the reasons of changing the lake area is tectonic activity.

Keywords: lake area, satellite image processing, Landsat-5, vision system, remote area measurement, modified descriptive image algebras.

Определение точных параметров озера как водного объекта (объёма, площади поверхности) является одной из актуальных задач, оно имеет не только научное, но и практическое значение, так как позволяет выявить особенности гидрометеорологического режима водоёмов и прогнозировать их дальнейшее развитие и воздействие на окружающую территорию. Озеро является динамичным природным комплексом. Оно изменяется под воздействием таких природных факторов, как осадки, температура, времена года, сдвиг подземных пластов и близлежащих к озеру пород. Известны случаи, когда озёра могут исчезать. В Башкортостане зимой в 2010 г. исчезло озеро около посёлка Архангельское. Известно и исчезновение озера в селе Сахаево на территории Южного Предуралья [4]. Причинами этих явлений в основном являются карстовые процессы, однако это может быть связано и с перемещением земных пластов в вертикальной плоскости вследствие добычи нефти на близлежащей к озеру территории. В зоне добычи нефти скорость движения земной поверхности значительно увеличивается и может превышать 90 мм/год. Но этот вопрос требует специального и глубокого исследования. Гидрологические полевые исследования озёр требуют достаточно больших материаль-

ных затрат. Одним из возможностей проведения комплексных исследований динамики развития озера является использование спутниковых снимков, технологий картографирования и обработка изображений с помощью математических методов, специализированных компьютерных программ [2–4].

Вопросы оценки погрешности дистанционного измерения площади объекта рассматривались в ряде работ [5–8]. В работе [9] для определения площади акватории разнотипных озёр разработана программа обработки спутниковых данных Landsat-8 и Sentinel-2. Проведён анализ погрешности дистанционного измерения площади пространственных объектов на основе математического моделирования их границ для озёр [10].

Целью данного исследования является точное измерение площади озера Аслыкуль на основе нового метода обработки спутниковых изображений с применением математического аппарата модифицированных дескриптивных алгебр изображений и анализ результатов измерения.

Объекты и методы исследования

Площадь водного зеркала озера является величиной, характеризующей его гидрогра-

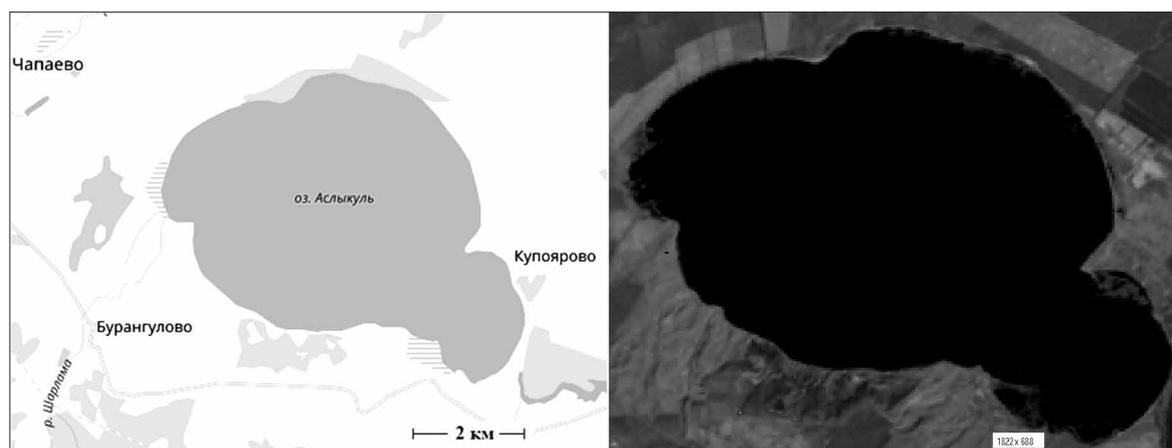


Рис. 1. Озеро Аслыкуль: изображение озера на карте (слева), космический снимок озера от спутника Landsat-5 (справа)
Fig. 1. Lake Aslykul: on the left is the image of the lake on the map, on the right is a satellite image of the lake from the Landsat-5 satellite

фическое состояние. Результаты измерения площади озера при помощи геоинформационных систем представляют особый интерес. Озеро Аслыкуль (рис. 1) – одно из самых крупных на территории Южного Предуралья. Оно расположено в северо-восточной части Бугулминско-Белебеевской возвышенности, имеет эллиптическую форму.

Исследование озера описано в работе [11]. Геологическая съёмка территории в окрестности озера в масштабе 1:200000 произведена в [12]. Более детальное исследование динамики развития озера выполнено в работах [13–15]. Из многих литературных источников следует, что озеро имеет карстовое происхождение. Однако изучение геологических материалов работы [11] и других показывает, что озёрная котловина имеет тектоническое происхождение. Анализируя древние источники, установлено, что озеро возникло в результате сильного землетрясения [16]. Исследования картографических материалов и данных космической съёмки позволяют установить периодические изменения площади поверхности озера. Периодические изменения площадей озёр анализировали также в работе [17].

Для точного измерения площади озера Аслыкуль были использованы космические снимки спутника Landsat-5 за 1987–1998 гг. [18, 19] в трёх инфракрасных каналах (B4, B5 и B7) с пространственным разрешением 30 м. Работа состояла в измерении площади озера Аслыкуль по космическим снимкам для прогнозирования динамики площади. Достоверность измерений гарантируется, если все начальные данные (изображения) соответствуют следующему требованию: объект наблюдения не перекрывается другими объектами (облака над озером, плохое качество съёмки, лёд на поверхности озера и т. п.). Это означает, что начальные данные отбираются экспертом и подлежат визуальному контролю перед вычислительным экспериментом. Период в 10–12 лет является достаточным сроком для наблюдения существенных изменений площади озера, что явилось причиной выбора размаха в 12 лет.

Как показал визуальный контроль доступных данных, именно промежуток с 1987 по 1999 гг. соответствует предъявляемым требованиям. Имеется ряд возможных методологий обработки изображений [2–3, 9]. В данной работе для обработки изображения использован алгебраический подход, разработанный нами [20, 21].

Математический метод анализа изображений для вычисления площади объекта представляется в виде:

$$N = \text{Alg}(I_{color}; \langle n, \theta \rangle)$$

$$\left\{ \begin{aligned} I_{bin} &= \|z_{ij}\|, I_{gray} = \|y_{ij} \\ I_{color} &= \left\| \langle r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} \rangle \right\| \end{aligned} \right.$$

$$\|y_{ij}\| = O_T^{color \rightarrow gray} \left(\left\| \langle r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} \rangle \right\|; * \right),$$

$$y_{ij} = \left[\frac{r_{ij} + g_{ij} + b_{ij}}{3} \right]$$

$$\| \bar{y}_{ij} \| = O_T^{medfilter} (\|y_{ij}\| : (n, n) \in W),$$

$$\bar{y}_{ij} = \text{med} [y_{i+n, j+n}; (n, n) \in W],$$

$$\|z_{ij}\| = O_T^{gray \rightarrow bin} (\| \bar{y}_{ij} \|; *),$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 0, & \bar{y}_{ij} < \theta \\ 1, & \bar{y}_{ij} \geq \theta \end{cases}$$

$$m, S = O_S^{blabel} (\|z_{ij}\| : q), \quad q \in \{4, 8\}$$

$$S = \{S_k, k=1, m, |S_{exp} - S_k| \leq \varepsilon, \varepsilon \in [0, 1]\},$$

где I_{bin} , I_{gray} и I_{color} – бинарное, полутоновое и цветное изображение; $\langle r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} \rangle$ – пиксели цветного изображения I_{color} ; y_{ij} – пиксели полутонового изображения I_{gray} ; z_{ij} – пиксели бинарного изображения I_{bin} ; θ – порог конвертирования, y_{ij} – полутоновое изображение, полученное в ходе медианной фильтрации с апертурой (n, n) , m – количество водоёмов на изображении, S – суммарная площадь отдельных частей S_k измеряемого водоёма с точностью ε по сравнению с экспертной оценкой S_{exp} , величина q означает связность пикселей. В области обработки изображений $q = 4$ означает четырёхсвязность, а $q = 8$ – восьмисвязность пикселей, N – количество пикселей площади измеряемой области. В ходе обработки изображений (конвертирования) в (1) варьируются два параметра – апертура медианного фильтра (n, n) и порог конвертирования θ полутоновых изображений в бинарные изображения. Далее ставится задача нахождения оптимальных параметров двухпараметрической целевой функции $G(\mu)$ с линейными ограничениями, которая получается с использованием метода обработки и анализа изображений:

$$G(\bar{\mu}) = \left| N^* - O_S^{blabel} (O_T^{gray \rightarrow bin} (O_T^{medfilter} (O_T^{color \rightarrow gray} (*); \right.$$

$$\left. \left\| \langle r_{ij}, g_{ij}, b_{ij} \rangle \right\|, n, \theta) \right) \rightarrow \min_{\bar{\mu} \in X}, \quad (2)$$

$$X = \left\{ \begin{aligned} &\mu | \bar{\mu} = \langle n, \theta \rangle; \\ &n > 6, 0 < \theta \leq 1 \end{aligned} \right\} \subset N \times Z. \quad (3)$$

Результаты и обсуждение

С использованием математического аппарата модифицированных дескриптивных алгебр изображений была разработана целевая функция системы компьютерного зрения для измерения площади озера Аслыкуль [21]. Измерительная функция системы компьютерного зрения используется в постановке задачи поиска оптимальных параметров (n_i, θ_i) целевой функции. Здесь n_i – апертура медианного фильтра, θ_i – порог конвертирования полутонового изображения в бинарное, $i = 1, 2, \dots$,

m (табл.). Число экспериментов m для одного года и канала достигала 1000, из которых выбирались отличные друг от друга результаты. Из 1000 экспериментов с оптимальными параметрами в воронку попадали порядка 60%.

В ходе вычислений и обработки данных с помощью программного комплекса системы технического зрения были определены площадь озера и её отклонение от эталона $\Delta_{\text{эталон}}^i = S_{\text{эталон}} - S_i$, отклонение от среднего арифметического $\Delta_i = S_{\text{сред.ариф}} - S_i$ и нормированная по эталону площадь за 1987 г. в пикселях (табл.). Один пиксель покрывает площадь 900 м². Умножая количество пикселей на 900 м², получим площадь озера в м², которую преобразуем в км².

Экстремальные значения \min и \max площадей нужны для выявления допустимых

Таблица / Table

Результаты измерения площади на спутниковых снимках по каналам В4, В5 и В7 ИК диапазона за один год / The results of measuring the area in satellite imagery on channels B4, B5 and B7 infrared in one year

№ No.	Наименование параметра Parameter name	(n_1, θ_1)	(n_2, θ_2)	(n_3, θ_3)	Среднее арифметическое Average
В4	Нормированная по эталону площадь Area normalized by reference	1,02	0,49	0,79	1,25
	Площадь озера, S_i , пиксель The area of the lake, S_i , pixel	25036	25419	25095	25094
	Отклонение от эталона, пиксель Deviation from the reference, pixel	259	-124	200	316
	Отклонение от среднего арифметического, пиксель Deviation from arithmetic mean, pixel	58,3	-324,7	-0,7	0
В5	Нормированная по эталону площадь Area normalized by reference	0,76	0,92	0,81	1,25
	Площадь озера, S_i , пиксель The area of the lake, S_i , pixel	25102	25528	25089	25139
	Отклонение от эталона, пиксель Deviation from the reference, pixel	193	233	206	317
	Отклонение от среднего арифметического, пиксель Deviation from arithmetic mean, pixel	37,6	-389,4	49,6	0
В7	Нормированная по эталону площадь Area normalized by reference	7,3	0,9	3,1	10,3
	Площадь озера, S_i , пиксель The area of the lake, S_i , pixel	23442	25522	24514	22802
	Отклонение от эталона, пиксель Deviation from the reference, pixel	1853	227	781	2614
	Отклонение от среднего арифметического, пиксель Deviation from arithmetic mean, pixel	-640	-2720	-1712	0
Минимальная/максимальная площадь в км ² The minimum/the maximum area in km ²			В4	22,418/23,273	
			В5	22,383/23,436	
			В7	18,214/23,376	

отклонений по каждому каналу. Для выявления отклонений в измерении площади озера использовали средние значения по минимально и максимально возможным значениям площади за каждый год, а также групповые средние по каналу В4. Аналогично проведены измерения и обработаны данные за период с 1987 по 1998 гг. На рисунке 2 по результатам измерений представлена закономерность изменения площади поверхности озера.

Известно, что площадь водоёмов тесно связана с атмосферными осадками и температурой. На рисунке 3 представлены изменения количества атмосферных осадков и среднегодовых температур по данным метеостанции с. Чишмы с 1986 по 2000 гг. Анализ графика изменения среднегодового количества осадков показывает, что количество осадков не соответствует увеличению площади озера. Так, 1987 г. был влажным годом, но воды в озере было немного. Сокращение количества осадков было в 1988 г., в то время как площадь озера увеличивалась. В 1991 г. было минимальное количество осадков, но площадь водного зеркала озера в этом году достигла максимальных значений. На графике наблюдается несовпадение жарких лет с годами, когда площадь водного зеркала озера сокращается. Так, 1994 г. был холодным, но количество воды в озере уменьшилось, а в сравнительно жарком 1995 г. произошло увеличение объёма воды в озере.

Сопоставление графика изменения площади озера и графиков среднегодовых темпе-

ратур и осадков показало, что эти климатические факторы не являются основными причинами, вызывающими изменение площади озера. Коэффициенты корреляции между средней площадью, количеством осадков ($r = -0,31$), июльской температурой ($r = -0,13$), среднегодовой температурой ($r = 0,07$) по годам (рис. 2, 3) подтверждают этот вывод.

Для выяснения причины изменения площади сопоставили границы озера за 12 лет по изученным космическим снимкам. Анализ показал, что озеро медленно сдвигается в юго-восточном направлении. Причиной движения является поднятие западной гряды, которая разделяет озёра Аслыкуль и Кандрыкуль.

Поднятия гряды определены по данным повторных нивелирований [13–15]. Согласно проведённым исследованиям, установлено, что поверхностные воды оказывают незначительное влияние на динамическое развитие. Следовательно, одной из основных причин динамики озера является подпитка за счёт подземных вод, а именно, тектонические движения земных пластов приводят к изменению уровня подземных вод и их перемещению между земными пластами. Тектоническое изменение профиля дна также может быть одной из причин. Следовательно, современные тектонические движения регулируют их поступление в озёрную котловину, соответственно и смещение озера. Так можно объяснить периодические изменения площади водного зеркала.

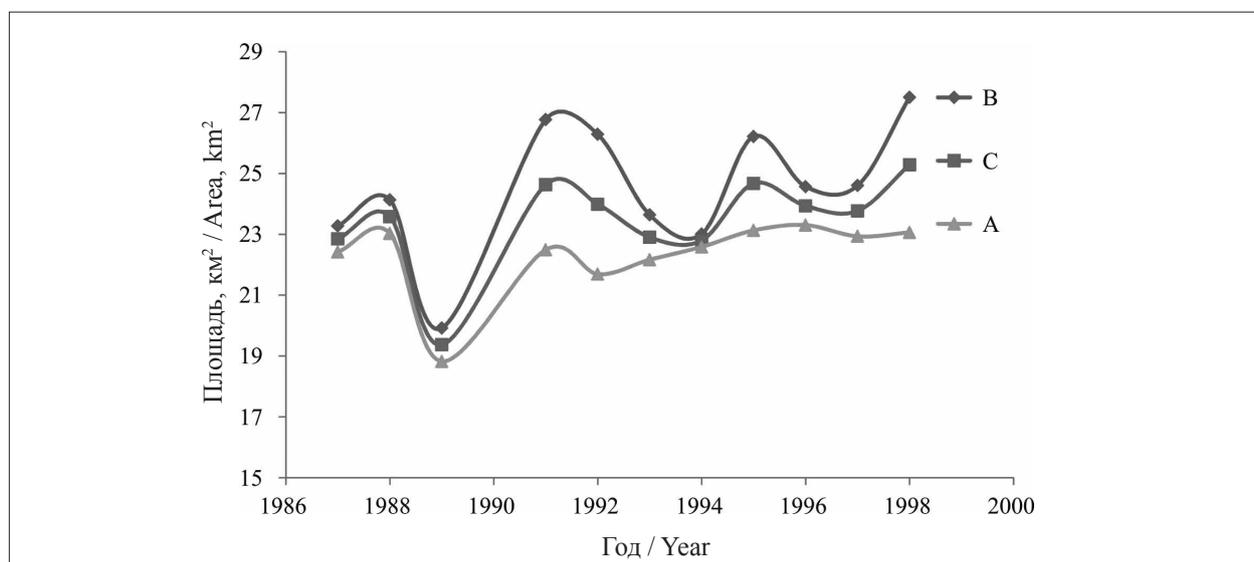


Рис. 2. Динамика площади озера Аслыкуль за 1987–1998 гг. по каналу В4: А – минимально возможные площади, В – максимально возможные площади за исследуемый период, С – динамика средней площади

Fig. 2. Dynamics of the area of Lake Aslykul for 1987–1998 on channel В4: А – the minimum possible area, В – the maximum possible area for the study period, С – the dynamics of the average area

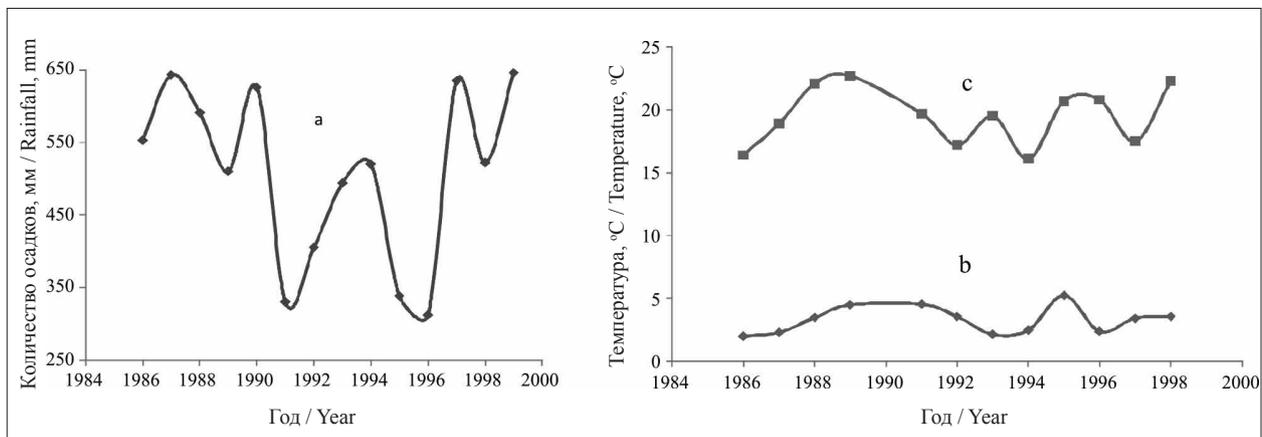


Рис. 3. Распределение среднегодового количества осадков (а), среднегодовой температуры (b) и июльской температуры (с) по метеостанции с. Чишмы с 1987 по 1998 гг.

Fig. 3. On the left is a graph of the distribution of average annual rainfall (a), on the right is a graph of average annual temperature (b) and a graph of July temperature (c) at the weather station in Chishmy from 1987 to 1998

Заклучение

В данной работе приведены результаты измерения площади озера Аслыкуль с применением математического аппарата модифицированных алгебр изображений. Согласно полученным измерениям, установлено, что озеро за изучаемый промежуток времени увеличило свою площадь на 2,5–3 км² и эта тенденция изменения площади сохраняется. Только современные перемещения земных пластов могут вызвать поступление подземных вод в озёрную котловину и изменение площади поверхности озера. Основной причиной изменения площади озера Аслыкуль, на наш взгляд, являются современные тектонические движения, которые могут быть подтверждены батиметрическими измерениями профиля дна в пространстве и во времени.

Приведённая методология может быть использована для определения площадей пастбищ, пахотных угодий, при изучении динамичности развития замкнутых водоёмов (прудов, водохранилищ, озёр, болот и др.), их гидрологического режима и связи с другими водными объектами. Данная методика исследования водоёмов позволяет определить их состояние в будущем с точки зрения подтопления или осушения прилегающих к ним участков местности, развития абразионных, экзогенных и экологических процессов.

Статья подготовлена по теме Государственного задания № 0148-2019-0007 «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования».

References

1. Smirnov A.I. Abnormally large karst failures of the South Urals and Cis-Urals [Internet resource] http://ig.ufaras.ru/File/E2013/06_01_13.pdf (Accessed: 22.05.2020).
2. Shovengerdt R.A. Remote sensing. Models and image processing methods. Moskva: Technosphere, 2010. 560 p. (in Russian).
3. Lillesand T., Kiefer R.W., Chipman J. Remote sensing and image interpretation. Wiley, 2015. 736 p.
4. Kut'yavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Remote monitoring of overgrowth of the eutrophied reservoir water area by higher aquatic vegetation // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 36–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-036-040
5. Crapper P.F. Errors incurred in estimating an area of uniform land cover using Landsat // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1980. V. 46. No. 10. P. 1295–1301.
6. Bryksina N.A., Polishchuk Yu.M. Investigation of the accuracy of remote measurement of lake areas using satellite imagery // Geoinformatica. 2013. No. 1. P. 64–68 (in Russian).
7. Koroleva N.V., Ershov D.V. Error estimation for determining the area of windfalls from space images of high spatial resolution LANDSAT-TM // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2012. V. 9. No. 1. P. 80–86 (in Russian).
8. Kornienko S.G. Estimation of the error in measuring the area of water bodies in the permafrost zone according to satellite imagery of various spatial resolutions // Kriosfera Zemli. 2014. V. 18. No. 4. P. 86–93 (in Russian).
9. Dontsov A.A., Sutorikhin I.A. Geoinformation system for determining the area of the water area of lakes // Polzunovskiy almanakh. 2016. No. 2. P. 93–95 (in Russian).
10. Kupriyanov M.A., Kochergin G.A., Polishchuk Yu.M. Analysis of the error of remote measurement of the area of

spatial objects based on modeling // Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. 2018. No. 3 (50). P. 25–34 (in Russian).

11. Vakhrushev G.V., Rozhdestvenskiy A.P. On the history of the development of the hydrographic network of the Southern Urals and Cis-Urals in connection with the latest movements of the earth's crust // Materialy po geomorfologii i noveyshey tektonike Urala i Povolzh'ya. Ufa: BF AN SSSR, 1962. P. 62–77 (in Russian).

12. Sinitsyn I.M., Sinitsyna G.I. State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200000. Sheets N-40-XIII (Belebey), N-40-XIX (Shafranovo). Moskva, 2000. 127 p. (in Russian).

13. Turikeshev G.T.-G., Kochurov B.I., Khayrullina R.G., Kozlova E.V. About the results of space-surveying and cartographic-geodetic studies of lakes of the South Cis-Urals // Ekologiya urbanizirovannykh territoriy. 2013. No. 4. P. 31–36 (in Russian).

14. Turikeshev G.T.-G., Kochurov B.I. On modern tectonics and tectonic geocology of the South Urals // Problemy regionalnoy ekologii. 2014. No. 6. P. 78–83 (in Russian).

15. Turikeshev G.T.-G., Donukalova G.A., Kutushev Sh.-I.B., Muhamadieva Z.A. On the results of carto-

graphic and geodetic studies of natural complexes of the Kama-Belskaya Depression // Geodeziya i kartografiya. 2013. No. 9. P. 41–48 (in Russian).

16. Shakurov R.K. To the seismic history of the Cis-Urals // Shar'yazhno-nadvigovaya tektonika i yeyo rol' v formirovaniy poleznykh iskopayemykh. Ufa: UNTS RAN IG, 1991. P. 130–132 (in Russian).

17. Ismagilova A.A., Galimova R.G. Analysis of the level regime of the lakes of the Bashkir Cis-Urals // Innovatsionnaya nauka. 2015. No. 11. P. 304–306 (in Russian).

18. The official website of the US Geological Survey USGS [Internet resource] <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed: 21.11.2017).

19. MapExpert official website [Internet resource] http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=7&table=KA (Accessed: 30.08.2017).

20. Iskhakov A.R., Malikov R.F. Modeling of vision systems in modified descriptive image algebras: a monograph. Ufa: Izd-vo BGPU, 2015. 159 p. (in Russian).

21. Iskhakov A.R., Malikov R.F. MDAITool 1.0 software package // Khronika obyedinennogo fonda elektronnykh resursov. Nauka i obrazovaniye. 2016. No. 9 (88). P. 34 (in Russian).