

Статистический анализ гидрофизических параметров бессточного озера

И.А. Суторихин^{1,2}, У.И. Янковская¹

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН (Барнаул, Россия)

² Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

Statistical Analysis of Hydrophysical Parameters of Closed Lakes

I.A. Sutorikhin^{1,2}, U.I. Yankovskaya¹

¹ Institute of Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the RAS (Barnaul, Russia)

² Altai State University (Barnaul, Russia)

Потепление современного климата юга Западной Сибири проявляется в снижении водности озер, расположенных на ее территории, в первую очередь бессточных озер. При оценке качества расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометеорологических исследований (в частности уровня воды и уровня жидких осадков) особое значение должно быть уделено оценке точности и надежности получения расчетных значений. Целью данного исследования было определение вероятности изменения уровня воды (увеличения, уменьшения), а в дальнейшем — прогнозирования весеннего половодья на изучаемом объекте по измеренным гидрофизическим характеристикам. В ходе данной работы были получены эмпирические функции распределения уровня воды в озере за два периода наблюдения (2013–2014 гг. и 2014–2015 гг.), определены теоретические функции распределения исследуемой характеристики. Приведен статистический анализ точности прогноза гидрофизических характеристик. Средняя квадратичная погрешность расчета проектных значений гидрологических характеристик и их параметров определялась с учетом отклонений эмпирических точек от теоретических зависимостей.

Ключевые слова: уровень воды, гидрологические характеристики, вероятность, озеро, прогноз, функция распределения.

DOI 10.14258/izvasu(2016)1-12

Введение. Средние и мелкие водоемы на территории Алтайского края мало изучены. Изучение этих объектов, численность которых достигает порядка 10000, чрезвычайно важно, так как они активно используются в хозяйственной деятельности (орошение полей и приусадебных участков). Проблема

Warming of the climate of the south of Western Siberia manifests in water content reduction of lakes in the territory, particularly closed lakes. Accuracy and reliability of calculated values are of utmost importance for quality evaluation of calculated hydrological characteristics over actual data of hydrometeorological survey (in particular, water and liquid precipitation levels). The goal of this study is to evaluate the probability of water level changes (increasing, decreasing) and, further, predict spring floods on the basis of hydrometeorological survey data. Empirical and theoretical lake water level distribution functions for two observation periods (2013–2014 and 2014–2015) have been obtained, and statistical analysis of prediction accuracy of hydrological characteristics is performed. Root mean square errors for predicted hydrological characteristics are estimated using deviations between theoretical (predicted) and empirical dependencies.

Key words: water level, hydrological characteristics, probability, lake, prediction, distribution function.

сохранения и прогнозирования состояния озер и водоемов на территории Алтайского края является актуальной на данный момент. Изменение климата, антропогенное воздействие могут привести к изменению водности озер, а следовательно, — и к проблемам, связанным с использованием водных ресур-

сов. Современный уровень изучения водных объектов предполагает проведение регулярных систематических измерений как гидрофизических величин, характеризующих состояние водных объектов, так и метеорологических параметров, приводящих к изменению этих состояний [1, с. 1419–1428].

Создание однородного ряда наблюдений за водосборами водных объектов позволит выявить факторы, вызывающие изменения водного режима озер, произвести более точные расчеты и прогнозирование стока [2, с. 200–223; 3, с. 350].

В настоящее время процессы формирования паводкового стока, изменение уровня воды водоемов изучены достаточно хорошо. Их наиболее полный анализ содержится в монографии *Studies in Mountain Hydrology* [4, с. 23–47, 58–64].

Различные варианты описания этих процессов содержатся в многочисленных работах, посвященных моделированию стока. Накопленный в этой области опыт обобщен в монографии Л.С. Кучмента [5, с. 98–129], в Руководстве по гидрологической практике Всемирной метеорологической организации [6, с. 47–83].

Успешное решение многих гидрологических задач требует разработки новых аппаратных и методических средств исследования условий формирования стока, расчетных и прогнозных схем.

Методы исследования. На бессточном озере Красиловское, расположенном в Косихинском районе, на территории учебно-научного стационара АлтГУ в июле 2013 года установлен автономный многоканальный измерительный комплекс «АПИК», созданный учеными ИМКЭС СО РАН. Комплекс состоит из трех блоков: «Акваплатформа», «Береговой», «Стационар», которые в режиме реального времени производят измерения метеорологических и гидрофизических параметров [7, с. 188]. Озеро расположено в 60 км от краевого центра (Косихинский район Алтайского края), является бессточным

с площадью зеркала 0,8 км² и площадью водосбора 55,7 км² [8, с. 116, 3].

Последовательность наших определений расчетных значений гидрофизических параметров (уровень воды, уровень жидких осадков) состояла в следующем [9, с. 13, 10, с. 47]: расчет эмпирических вероятностей превышения и построение эмпирического распределения; расчет показателей вариации; расчет коэффициентов вариации и асимметрии (C_v, C_s) и их отношения (C_s/C_v); аппроксимация эмпирического распределения аналитическими распределениями при установленных параметрах; определение квантилей заданной обеспеченности при наилучшей аналитической аппроксимации.

Основные результаты. На рисунке 1 представлено изменение уровня воды за период 2013–2015 гг. включительно. Как видно, минимальное значение уровня приходится на февраль 2014 года и составляет 162 мм, максимальное значение — 1804 (сентябрь 2015 года). Всего за 3 года имеется 246 среднемесячных значений уровня воды.

Был получен интервальный ряд, для которого составили эмпирическую функцию распределения $F_1^*(x) = P^*(X < x)$. Аналитическое выражение имеет вид:

$$F_1^* = \begin{cases} 0; & x \leq 86, \\ 0,01; & 86 < x \leq 286, \\ 0,27; & 286 < x \leq 484, \\ 0,64; & 484 < x \leq 683, \\ 0,80; & 683 < x \leq 882, \\ 0,83; & 882 < x \leq 1081, \\ 0,89; & 1081 < x \leq 1280, \\ 0,93; & 1280 < x \leq 1480, \\ 0,97; & 1480 < x \leq 1678, \\ 1; & x > 1678. \end{cases} \quad (1)$$

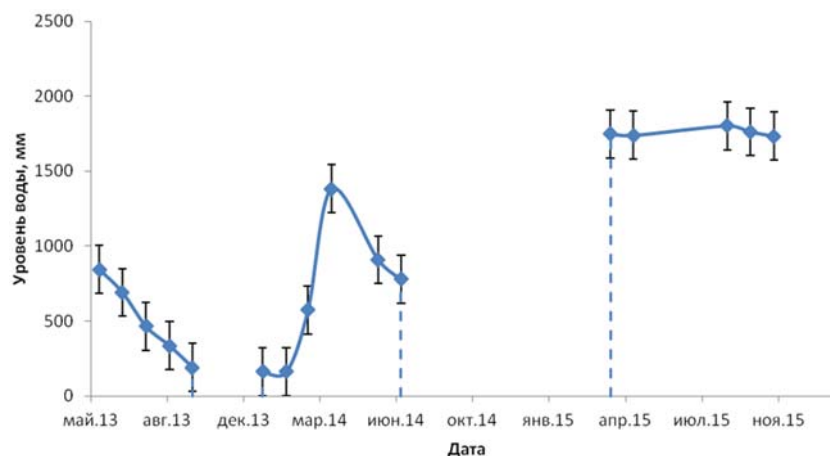


Рис. 1. Динамика уровня озера Красиловое (2013–2015 гг.)

$$F_2^* = \begin{cases} 0; & x \leq 100, \\ 0,01; & 100 < x \leq 105, \\ 0,02; & 105 < x \leq 340, \\ 0,23; & 576 < x \leq 812, \\ 0,31; & 812 < x \leq 1047, \\ 0,41; & 1047 < x \leq 1283, \\ 0,49; & 1283 < x \leq 1755, \\ 1; & x > 1755. \end{cases} \quad (2)$$

(1) — эмпирическая функция распределения для первого периода исследования (2013–2014 гг.), (2) — эмпирическая функция распределения для второго периода исследования (2014–2015 гг.).

С функцией распределения $F^*(x)$ рассматриваемой нами величины связана плотность функции распределения $f(x)$, представленная на рисунках 2 и 3. Аппроксимация плотности функции распределения была проведена функцией Гаусса.

Сравнение эмпирического $F^*(x)$ и теоретического распределения $F(x)$ (предполагаемого в гипотезе) производится с помощью специально подобранной функции — критерия согласия. Рассмотрим критерий согласия Пирсона (критерий χ^2) [10, с. 57]:

$$\chi_{\text{наб}}^2 = \sum \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \approx 141.$$

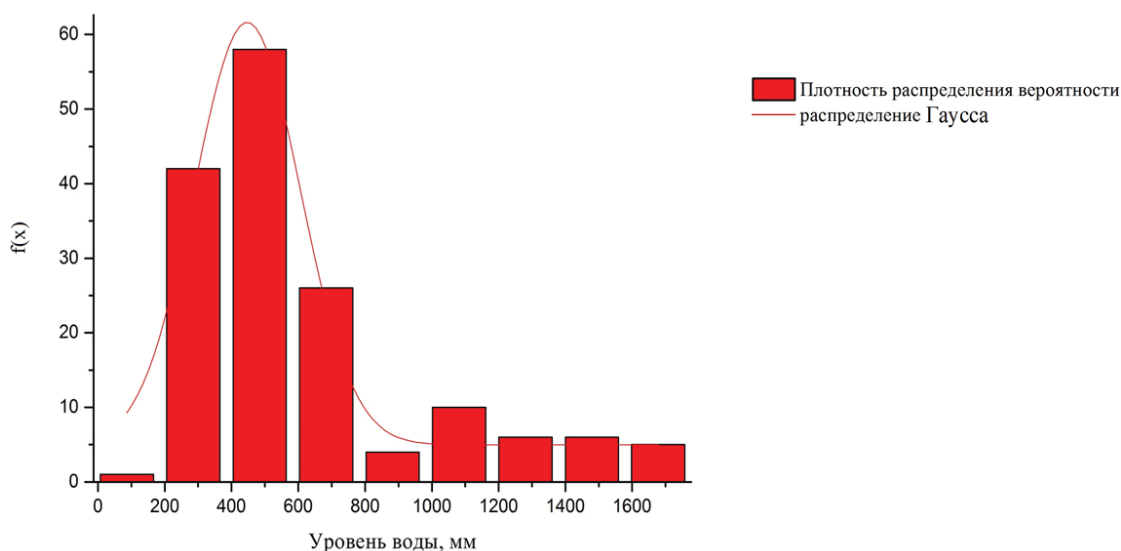


Рис. 2. Плотность функции распределения уровня озера Красилово (2013–2014 гг.)

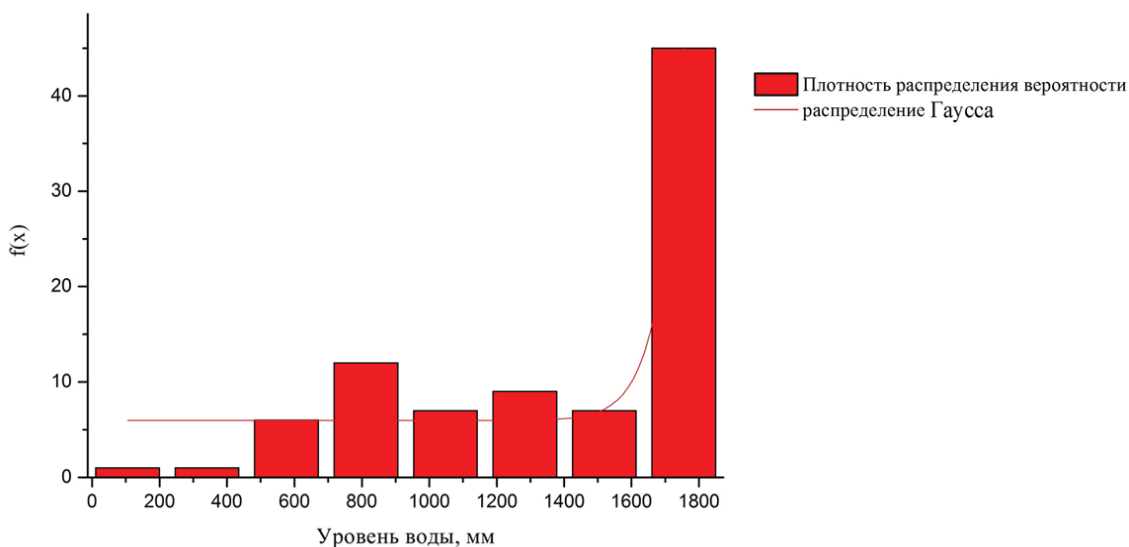


Рис. 3. Плотность функции распределения уровня озера Красилово (2014–2015 гг.)

Для проверки гипотезы о распределении было необходимо оценить 2 параметра — математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение:

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 f}{\sum f} = 135871,06 \text{ — дисперсия вы-}$$

борки;

$$M(x) = \sum_{i=1}^k p_i x_i = 531,77 \text{ — математическое ожи-}$$

дание;

$$\sigma = \sqrt{D} = 368,61 \text{ — среднеквадратичное откло-}$$

нение.
В качестве анализируемой характеристики исследовались коэффициент вариации (C_v) и коэффициент асимметрии (C_s) уровня жидких осадков:

$$D = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 f}{\sum f} = 135871,06;$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = 0,69;$$

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} = 1,41,$$

их отношение равно: $C_s/C_v = \frac{1,41}{0,69} \approx 2$.

Критическую границу $\chi^2_{кр}$ находим по таблицам распределения, получили значение, равное 158,7.

Проверка гипотезы о теоретическом распределении показала, что справедливо предположение о том,

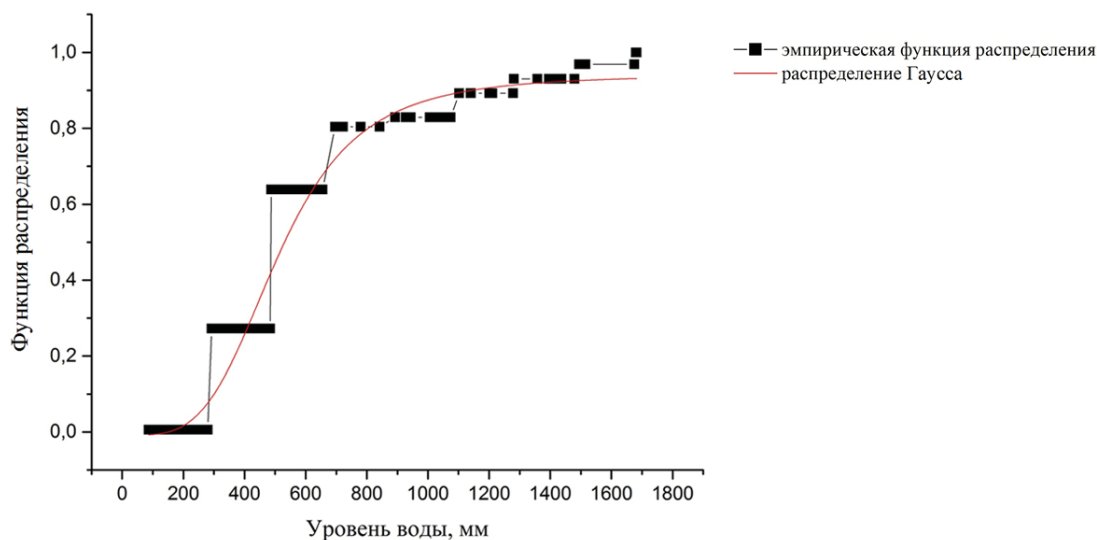


Рис. 4. Функция распределения уровня озера Красилово (2013–2014 гг.)

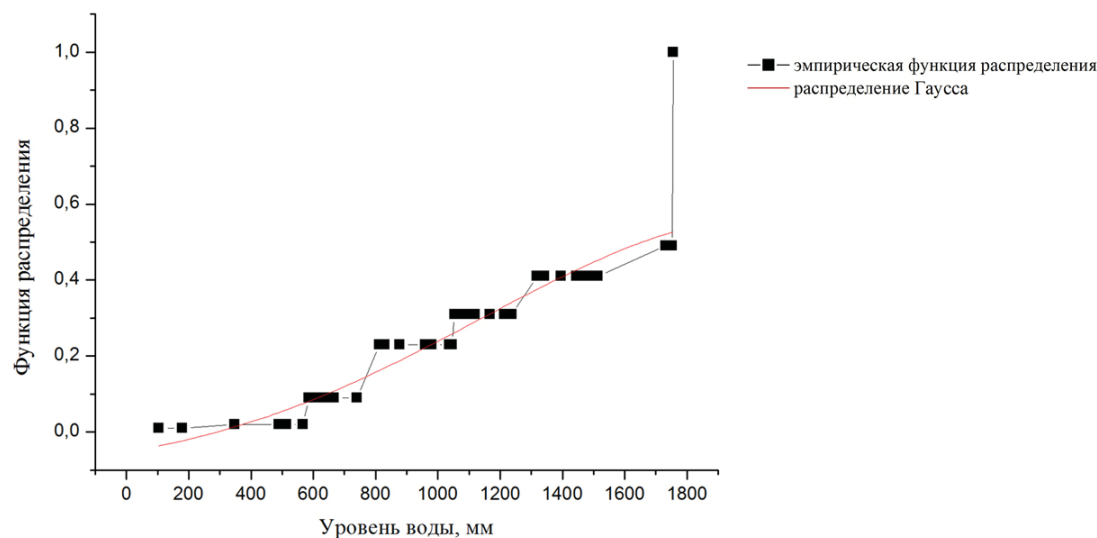


Рис. 5. Функция распределения уровня озера Красилово (2014–2015 гг.)

что данные выборки имеют нормальное распределение. На рисунках 4 и 5 представлены эмпирические и теоретические функции распределения для гидрофизической величины — уровень воды.

Выводы. По результатам статистического анализа получили, что плотность распределения уровня воды в бессточном озере Красиловское описывается нормальным (или Гауссовским) распределением. Получено, что значение уровня воды находится в прямой зависимости от количества осадков, выпавших на акваторию озера.

Критерий окончательного выбора аппроксимирующего аналитического распределения основывался

на следующих условиях: минимум суммы квадратов отклонений между эмпирическим и аналитическим распределением; минимальные расхождения между эмпирическими данными и аналитической аппроксимацией в интересующей области экстраполяции.

Эти условия характеризуют общую эффективность аппроксимации для всего эмпирического распределения и для областей редких событий, которые и представляют основной практический интерес.

Малая погрешность полученных расчетов позволяет говорить о высокой точности прогноза изменения уровня воды в озере Красиловское.

Библиографический список

1. Beatrix E. Beisner, Maria Lorena Longhi Spatial overlap in lake phytoplankton: Relations with environmental factors and consequences for diversity // *Limnology and Oceanography*. — 2013. — № 58(4).
2. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. — СПб., 2011.
3. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Джамалов Р.Г., Рец Е.П., Телегина Е.А. Изменение водного режима и сезонного стока рек и их влияние на экстремальные гидрологические ситуации // *Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов : труды IV Всеросс. науч. конф. с междунар. участием*. — М., 2015.
4. *Studies in Mountain Hydrology* / ed. A. Herrmann, U. Schröder. — INP/HWRP Berichte, Heft 2. — Koblenz, 2004.
5. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). — М., 2008.
6. World Meteorological Organization. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO. — No. 168. Sixth ed. — Geneva, 2009.
7. Зуев В.В., Суторихин И.А., Кураков С.А., Залаева У.И. Измерительный комплекс для регистрации параметров окружающей среды на водном объекте // *Ползуновский вестник*. — 2014. — № 2.
8. Барышникова О.Н., Харламова Н.Ф., Козырева Ю.В., Ненашева Г.И. Физико-географическая характеристика комплексного учебно-научного стационара АлтГУ «Озеро Красилов»: учебное пособие. — Барнаул, 2013.
9. Рождественский А.В., Лобанов А.Г. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. — СПб., 2009.
10. Определение расчетных гидрологических характеристик : пособие П1–98 к СНиП 2.01.14–83. — Минск, 2000.