

УДК 551.482.215.1 (911.3:627.81)

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(29-38)

В. М. НИКИТИН, Н. В. АБАСОВ, Т. В. БЕРЕЖНЫХ, Е. Н. ОСИПЧУК

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия, nikitin1310@mail.ru, nva@isem.irk.ru, berejn@isem.irk.ru, eugene.os@mail.ru

**РИСКИ МАЛОВОДНЫХ И МНОГОВОДНЫХ ПЕРИОДОВ ДЛЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ**

*На основе гидрометеорологических данных по оз. Байкал за длительный период времени выполнен анализ колебаний уровня озера и определены его связи с вековыми и внутривековыми циклами водности. Приведены обобщенные показатели многолетнего диапазона и внутригодовой амплитуды колебаний уровня, его динамики, дат достижения минимальных и максимальных значений в естественных условиях и в период зарегулированного стока. Расширена и уточнена имеющаяся информация по ежемесячным показателям уровня, полезного притока в оз. Байкал и расхода воды в истоке р. Ангары за длительный период наблюдений. Установлены границы вековых и внутривековых циклов, многоводных, маловодных лет на оз. Байкал и их характеристики за исторический (1747–1903 гг.) и современный (1904–2015 гг.) периоды. Выполнена классификация водности по категориям (нормальная, пониженная/повышенная, низкая/высокая, экстремально низкая/экстремально высокая, катастрофическая) в зависимости от обеспеченности полезного притока в оз. Байкал, рассчитаны его количественные показатели для каждой из категорий. Рассмотрены причины, особенности, проблемы и риски, связанные с маловодными и многоводными периодами. Определено, что указанные периоды являются, как правило, следствием изменений в процессах циркуляции атмосферы, сопровождающихся положительными/отрицательными аномалиями летних температур и осадков на значительных территориях, прилегающих к бассейну оз. Байкал, а также глобальными изменениями климата. Определен основной фактор риска при регулировании уровня оз. Байкал в маловодные периоды — необходимость устойчивой работы водозаборов и связанного с этим поддержания минимальных расходов воды в нижнем бьефе Иркутской ГЭС (1300 м<sup>3</sup>/с), учитывающих минимальные проектные отметки водозаборов. Установлено, что риски многоводных периодов связаны с пропуском паводков через Иркутскую ГЭС и возможными затоплениями, которые в современных условиях неизбежны уже при расходах 2800–3000 м<sup>3</sup>/с и приведут к значительным затоплениям в г. Иркутске при пропуске через гидроузел допустимых действующими правилами расходов 4700–6000 м<sup>3</sup>/с.*

Ключевые слова: колебания уровня, полезный приток, водный баланс, вековые и внутривековые циклы водности.

V. M. NIKITIN, N. V. ABASOV, T. V. BEREZHNYKH, AND E. N. OSIPCHUK

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontova str., 130, Russia, nikitin1310@mail.ru, nva@isem.irk.ru, berejn@isem.irk.ru, eugene.os@mail.ru

**RISKS OF LOW- AND HIGH-WATER PERIODS FOR LAKE BAIKAL**

*On the basis of hydrometeorological data on Lake Baikal for a long period of time, an analysis is made of the lake level fluctuations, and their association with secular and intrasecular hydraulicity cycles. We provide generalizing indicators of the long-term range and intra-annual amplitude of level fluctuations and dynamics, and the dates of reaching minimum and maximum values under natural conditions and at the period of regulated flow. We expanded and updated information available for monthly indicators of the level, useful inflow into Lake Baikal and water discharge in the source of the Angara river for a long period of observations. The study identified the boundaries of secular and intrasecular cycles, high- and low-water years on Lake Baikal, and their characteristics for the historical (1747–1903) and modern (1904–2015) periods. A classification of hydraulicity was made by categories (normal, decreased/increased, low/high, extremely low/extremely high, and disastrous) according to the probability of useful flow into Lake Baikal, and its quantitative indicators were calculated for each of the categories. Emphasis is placed on the causes, characteristic features, problems and risks associated with low- and high-water periods. It is established that the aforementioned periods, as a rule, are the result of changes in the atmospheric circulation processes accompanied by positive/negative anomalies of summer temperatures and atmospheric precipitation across significant territories adjacent to the Lake Baikal drainage basin as well as by global changes of climate. We determined the main risk factor for the regulation of the Lake Baikal level at low-water periods, i. e. the need for the stable operation of the water intakes and the associated maintenance of minimum water flow rates in the tail race of the Irkutsk Hydropower Power Plant (HPP) (1300 m<sup>3</sup>/s) taking into consideration the minimum design marks of the water intakes. It is established that the risks of high-water periods are associated with the discharges of flood waters through the Irkutsk HPP, and with eventual inundations which under current conditions are unavoidable even in the case of water flow rates from 2800 to 3000 m<sup>3</sup>/s, and would lead to significant inundations in the city of Irkutsk in the event that the amounts of 4700–6000 m<sup>3</sup>/s are discharged through the hydroelectric scheme.*

Keywords: level fluctuations, useful inflow, water balance, secular and intrasecular hydraulicity cycles.

Проблемы регулирования уровня оз. Байкал, связанные с изменением притока воды, в последние годы привлекают повышенное внимание общественности, органов управления и научных организаций. С 1996 г. на Байкале наблюдался длительный маловодный период, в 2014–2015 гг. он перешел в экстремальное маловодье, сопровождаемое аномалиями летних температур и осадков, пожарами, другими негативными природными и социально-экономическими процессами. На основе анализа и систематизации данных, полученных за долгое время наблюдений, мы попытаемся ответить на следующие вопросы: уникальны ли эти процессы для оз. Байкал или же они являются частью более общих закономерностей; наблюдались ли подобные периоды ранее и в чем их отличия; какая существует связь между уровнем, притоком воды в озеро и изменениями климатических процессов; каковы причины, особенности, проблемы и риски маловодных и многоводных периодов.

### ВРЕМЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ

Временные колебания уровня и водности оз. Байкал были зафиксированы достаточно давно. Одним из первых это сделал Н. Г. Спафарий еще в 1675–1679 гг. во время дипломатической миссии в Китай через Сибирь [1]. Во второй половине XIX – начале XX в. вопросы, касающиеся уровня оз. Байкал, рассматривались Б. И. Дыбовским и В. А. Годлевским [2, 3], А. П. Орловым [4, 5], А. В. Вознесенским [6, 7], В. Б. Шостаковичем [8] и др. В этот же период (с 1886 г.) в пос. Лиственничное начались регулярные наблюдения за уровнем озера. В 1898 г. на юго-западе Байкала был открыт постоянно действующий водомерный пост — ст. Байкал. Привязка высоты нуля графика поста производилась при этом в двух системах: абсолютной — 453,27 м, по которой по настоящее время работает Иркутский гидрометцентр РФ, и Тихоокеанской системе высот (ТО) — 454,34 м, используемой при регулировании режимов работы Иркутской ГЭС и уровня оз. Байкал. В 1951 г. при подготовке технического проекта Иркутской ГЭС институтом «Гидроэнергопроект» были выполнены всесторонний анализ водности, расходов в истоке р. Ангары, расчеты уровня и баланса водных ресурсов озера [9]. В более позднее время исследования колебаний уровня Байкала и многолетних изменений его водности проводились Байкальской лимнологической станцией (в последующем — Лимнологический институт СО РАН) [10–14], а также Институтом систем энергетики им. Л. А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН [15–19] и другими научными организациями [20, 21].

С позиции комплексного анализа водных ресурсов и водного баланса бассейна оз. Байкал следует выделить работы Г. В. Лопатина [10] и А. Н. Афанасьева [11, 12], которые были выполнены 40–60 лет назад. С тех пор значительно увеличился срок гидрометеорологических наблюдений, прежде всего период зарегулирования стока после начала эксплуатации Иркутской ГЭС, изменились природно-климатические и социально-экономические условия, а также законодательство, регулирующее уровенные режимы и использование водных ресурсов оз. Байкал. На современном этапе возникает необходимость уточнить данные гидрометеорологического мониторинга и на основе расширенного непрерывного 130-летнего ряда наблюдений, а также отдельных более ранних данных проанализировать условия водности, водный баланс и уровенные режимы и другие обобщенные показатели, характеристики и закономерности.

Первые наблюдения за колебанием уровня воды в оз. Байкал проведены в с. Култук Б. И. Дыбовским и В. А. Годлевским [3] в 1868–1871 гг. Их данные позволяют получить характеристику общего хода уровня озера и его колебаний. Этот период совпал с выдающейся водностью 1869 г., когда амплитуда внутригодового изменения уровня составила 1,66 м, а сам уровень был зафиксирован на рекордной за весь период наблюдений в естественных условиях отметке 457,10 м ТО. Такой исключительный подъем был вызван значительными осадками в течение всего летнего периода и низкими летними температурами (например, средняя температура воздуха в Култуке в июле составляла менее 10 °С) [4, 10].

Несмотря на то что регулярных наблюдений за уровнем озера ранее 1868 г. не проводилось, А. Н. Афанасьев [12] считал, что степень изученности уровенного режима Байкала все же позволяет выделить и охарактеризовать его вековые и внутривековые циклы. На основе летописных материалов им построен примерный график многолетних колебаний среднего уровня оз. Байкал за период 1747–1958 гг. и выделены три вековых цикла. Первый вековой цикл, по его мнению, начался в 1700–1710 гг. и продолжался до 1814 г., второй — с 1815 по 1903 г., третий — с 1904 г. по настоящее время. При этом в каждом цикле отмечалось несколько внутривековых циклических колебаний. Приведенные данные недостаточно надежны, так как большая часть этого периода не подкреплена ре-

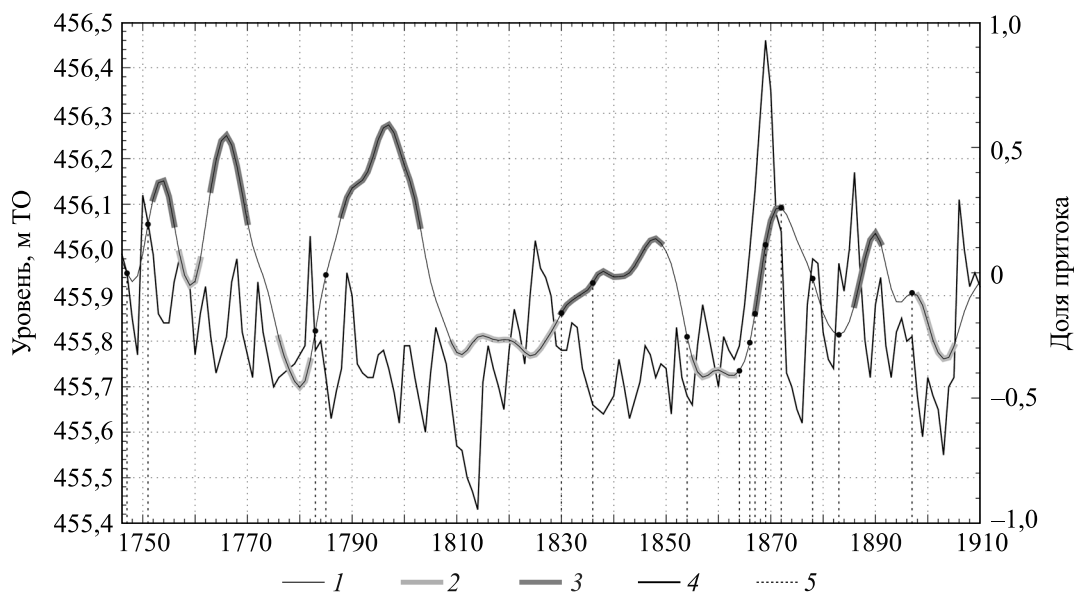


Рис. 1. График колебания уровня оз. Байкал в исторический период в сопоставлении с восстановленными по дендрохронологической информации изменениями притока монгольской части р. Селенги относительно ее нормы.

1 — среднегодовой уровень озера, по [12]; 2 — маловодные годы; 3 — многоводные годы; 4 — реконструированный скользящий средний ежегодный приток монгольской части р. Селенги; 5 — годы наводнений на р. Селенге, отмеченные в летописях.

зультатами постоянных наблюдений, отметки уровней не были привязаны к опорной нивелирной сети и верифицированы по другим источникам информации (атмосферные осадки, температура воздуха, приток рек, впадающих в озеро, расходы воды в истоке Ангары и др.). В связи с высокой корреляцией колебаний уровня оз. Байкал и притока р. Селенги с учетом реконструированной с 1638 г. дендрохронологической информации по ее отдельным участкам [22] представляется возможность выделить вековые циклы с маловодными и многоводными периодами на Байкале.

На рис. 1 приведен график среднегодового уровня оз. Байкал в исторический период 1747–1903 гг. по данным А. Н. Афанасьева [12] и по уточненным водно-балансовым расчетам этого периода в сопоставлении с притоком р. Селенги и сведениями о наводнениях, имеющимися в летописях г. Иркутска [23]. Хорошо просматриваются внутривековые циклы повышенной и пониженной водности с чередованием маловодных и многоводных периодов разной амплитуды и продолжительности: шесть внутривековых циклов, каждый из которых включает по одному маловодному и многоводному периоду. Наиболее продолжительный 42-летний цикл отмечался в первой половине XIX в. (маловодный период 1809–1829 гг. и многоводный 1830–1851 гг.). Если следовать рассматриваемой циклической закономерности, то можно предположить, что мы находимся в конце третьего векового цикла, завершающегося длительным 20-летним маловодным периодом, т. е. в начале нового, четвертого векового цикла.

При расчете обобщенных показателей уровня оз. Байкал и связанных с ним балансовых гидрологических характеристик были использованы данные непрерывных наблюдений с 1886 г., включая имеющиеся показатели за отдельные годы (1869–1871), по настоящее время (рис. 2). В табл. 1 приведены характеристики колебания уровня оз. Байкал в естественных условиях, до начала наполнения Иркутского водохранилища (1956 г.) и в зарегулированный период. Средняя многолетняя внутригодовая амплитуда колебаний уровня оз. Байкал в естественных условиях составляет 81 см. В маловодные и многоводные годы она значительно изменяется — в диапазоне от 39 до 166 см. В зарегулированный период, после завершения наполнения водохранилища к 1960 г., средняя многолетняя внутригодовая амплитуда немного увеличилась (до 87 см) при фактическом сохранении диапазона колебаний. Внутригодовой ход уровня также изменился незначительно и в целом остался близок к естественному циклу: в среднем минимум фиксировался во второй половине апреля, максимум — во второй половине сентября. Произошло некоторое смещение в сторону запаздывания дат относительно естествен-

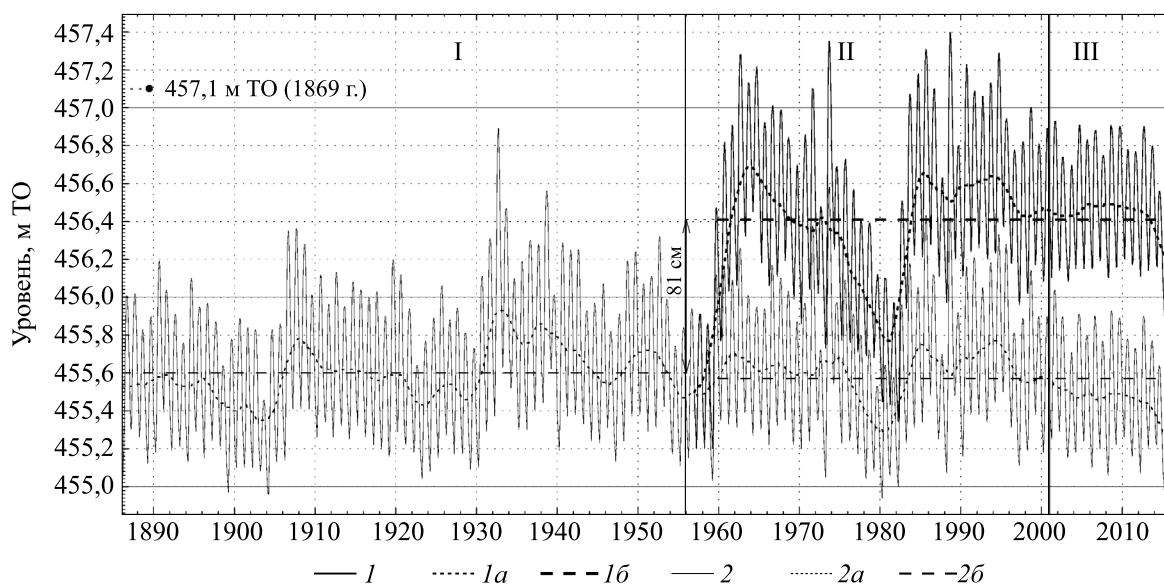


Рис. 2. График уровня озера Байкал.

Условия: I — естественные, II — зарегулированные, III — действия Постановления Правительства РФ № 234 от 26.03.2001 г. [24]. 1, 1а, 1б — фактический уровень, скользящий средний и средний за период 1869–1955 гг.; 2, 2а, 2б — фактический уровень, скользящий средний и средний за 1960–2015 гг.

Таблица 1

Колебания уровня озера Байкал, м ТО

Период	Уровень (год)		Диапазон колебаний	Средний многолетний уровень	Средняя многолетняя и внутригодовая амплитуда	Внутригодовая амплитуда (год)	
	минимальный	максимальный				минимальная	максимальная
1869–1955 гг.	454,93 (1904 г.)	457,10 (1869 г.)	2,17	455,60	0,81	0,39 (1903 г.)	1,66 (1869 г.)
1960–2015 гг.	455,27 (1982 г.)	457,42 (1988 г.)	2,15	456,41	0,87	0,43 (2015 г.)	1,81 (1973 г.)

ного режима: минимум наступает позднее в среднем на 9 дней, а максимум — на 8. Сроки достижения этих отметок как в естественных, так и в зарегулированных условиях определяются в первую очередь складывающимися гидрологическими и климатическими условиями, в том числе гидрологическими условиями предшествующего периода, весенним снеготаянием, осадками, температурами и атмосферными процессами летне-осеннего времени.

Кроме внутригодовых колебаний уровня, на оз. Байкал наблюдаются непрерывные краткосрочные денивеляционные колебания (сгонно-нагонные и сейшевые явления) продолжительностью от нескольких минут до 3–4 суток с амплитудой до 20 см и более [14]. В связи с этим, учитывая большие размеры озера, его сложную береговую конфигурацию, ежедневная фиксация уровня по всему озеру с точностью до 1 см представляется весьма условной. В целом внутригодовое и многолетнее изменение уровня озера тесно взаимосвязано с динамикой водного баланса, соотношением его приходной и расходной частей.

### ВОДНЫЙ БАЛАНС И ПОЛЕЗНЫЙ ПРИТОК

Наиболее полно исследования водного баланса оз. Байкал, его структуры и колебаний по всем элементам приходной и расходной частей за 1901–1971 гг. представлены в работах А. Н. Афанасьева [11, 12]. Однако из-за отсутствия точных данных наблюдений по поверхностному притоку, атмосферным осадкам, испарению, конденсации и подземным водам оценки величин полезного притока по классическим водно-балансовым моделям могут иметь значительные ошибки.

В этой связи ключевыми показателями водного баланса с учетом их удельного веса (более 80 % приходной и расходной частей водного баланса) выступают полезный приток в озеро и расход воды



в истоке р. Ангары. Полезный приток в озеро  $P$  за период  $T$  можно определить через расход воды в истоке Ангары  $Q$  и изменение объема воды в озере  $\Delta V$  в виде

$$P = Q + \Delta V/T, \quad \Delta V = \varphi(\Delta H), \quad Q = \psi(H), \quad (1)$$

где  $\varphi, \psi$  — калибровочные зависимости полезного объема озера от изменения его среднего уровня  $\Delta H$  и расхода р. Ангары  $Q$  от уровня озера  $H$  у его истока.

При известных среднемесячных расходах воды возможно уточнить уровни и притоки. Для естественных условий регулирования достаточно иметь всего одну надежную оценку — среднего уровня, расхода в истоке р. Ангары или полезного притока, на основе которой рассчитываются остальные показатели. Относительно точными для естественных условий являются данные по уровню озера.

Для зарегулированных условий найти третий показатель можно только при известных значениях двух оставшихся. Как правило, при эксплуатации ГЭС имеются достаточно точные данные о расходах через ее гидротехнические сооружения. Показатели полезного притока уточняются по данным о расходах воды через ГЭС и среднем уровне.

На основе приведенных выше уравнений водного баланса получены среднемесячные показатели полезного притока в озеро за период непрерывных наблюдений с 1886 по 2015 г., дополненные данными за 1869–1871 гг. [3]. Таким образом, на единой методической основе была расширена и детализирована вся имеющаяся информация по ежемесячному уровню, полезному притоку в оз. Байкал и расходу воды в истоке р. Ангары почти за 150 лет наблюдений.

На рис. 3 представлен график ежегодного полезного притока в Байкал и его производные за рассматриваемый период. Как и уровень, полезный приток имеет значительные временные колебания. При среднемноголетнем полезном притоке (норме)  $59,2 \text{ км}^3$  в год его минимальное значение составило  $35,9 \text{ км}^3$  в 1903 г. и  $35,2 \text{ км}^3$  в 2015 г., максимальное —  $108,7 \text{ км}^3$  в 1869 г. и  $102,8 \text{ км}^3$  в 1932 г. Для полезного притока, как и для связанного с ним уровня, характерна цикличность колебаний с сочетанием маловодных и многоводных периодов.

Если исходить из озвученного выше предположения, что с 1904 г. начался третий вековой цикл, продолжающийся в настоящее время, то можно отметить четыре внутривековых цикла: 1904–1929, 1930–1958, 1959–1982, 1983–2015 гг. Каждый включает по два характерных периода водности: многоводный — 1906–1915 гг. (средний полезный приток  $64,5 \text{ км}^3/\text{год}$ ), 1930–1942 ( $72,8$ ), 1959–1975 ( $62,8$ ), 1983–1995 ( $66,4$ ) и маловодный — 1922–1929 ( $51,8$ ), 1954–1958 ( $51,1$ ), 1976–1982 ( $45,5$ ), 1996–2015 гг. ( $52,3 \text{ км}^3/\text{год}$ ).

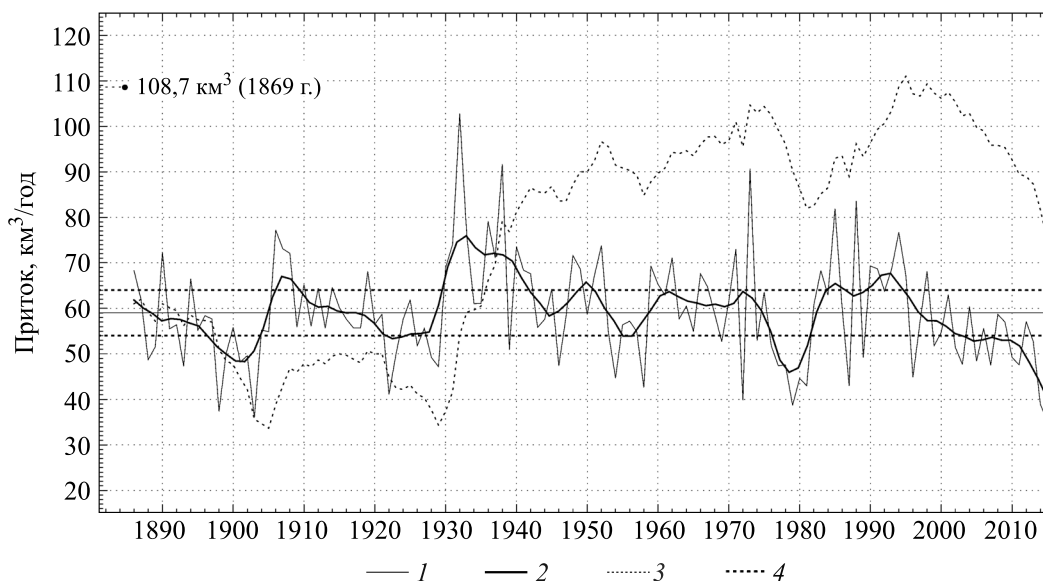


Рис. 3. График ежегодного полезного притока оз. Байкал в период 1886–2015 гг.

1 — полезный приток; 2 — скользящее среднее; 3 — интегрально-разностная кривая; 4 — диапазон нормы от среднего многолетнего значения.

Весьма неравномерно также и внутригодовое распределение притока в оз. Байкал. Водный режим бассейна озера характеризуется весенним половодьем, летними паводками и зимней меженью. Около 90 % притока приходится на теплый период (II и III кварталы), причем летние паводки III квартала дают основную часть годового притока, существенно изменяясь в многоводные и маловодные годы. В среднем за весь период наблюдений (1886–2015 гг.) полезный приток имеет следующую внутригодовую структуру: 4,5 % (I квартал), 38,6 (II), 51,7 (III), 5,2 % (IV квартал); в многоводный период (1930–1938 гг.) наблюдалась следующая структура: 3,9 % (I квартал), 35,5 (II), 53,3 (III), 7,3 % (IV квартал); в маловодный период (2002–2015 гг.) эти показатели составили 5,4 % (I квартал), 42,8 (II), 46,9 (III), 4,9 % (IV квартал). Минимальный приток наблюдается, как правило, в феврале и марте. В ноябре–декабре нередко бывает отрицательный полезный приток, связанный со значительными испарениями с поверхности озера.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДНОСТИ

В исследованиях, публикациях, статистических сборниках, методических указаниях и нормативно-правовых актах, посвященных использованию и регулированию водных ресурсов, встречаются различные характеристики (понятия) водности: нормальная (норма); средний, маловодный и многоводный период (год); очень, экстремально, катастрофически многоводный или маловодный год и др. К сожалению, единых, законодательно утвержденных понятий водности с их конкретными количественными оценками не существует. Это обстоятельство создает проблемы при мониторинге и анализе соответствующей гидрометеорологической информации, принятии управленческих решений, обосновании и подготовке законодательных актов. Не претендуя на универсальность и завершенность, ниже рассмотрим показатели водности применительно к оз. Байкал. На основе имеющихся ежемесячных данных о полезном притоке в озеро за весь период наблюдений и использования принятого в практике водохозяйственных и гидроэнергетических расчетов понятия обеспеченности притока составлена таблица показателей водности (табл. 2).

На рис. 4 и в табл. 3 представлена обеспеченность среднегодового полезного притока в оз. Байкал за период 1886–2015 гг. для разных условий водности. Показатели экстремальной водности (низкой и высокой), учитывая их достаточно широкий диапазон, можно дополнить понятиями катастрофически низкой и катастрофически высокой водности. Это возможные события очень редкой повторяемости (один раз в 1000 лет и реже), характеризующиеся годовым полезным притоком менее 30 и более 108 км<sup>3</sup> соответственно.

Анализ данных полезного притока в оз. Байкал за весь 130-летний ряд наблюдений позволяет распределить отдельные годы по категориям (группам) водности с учетом приведенной выше классификации. Нормальная (средняя) водность (группа 4) наблюдалась в 28 годах (21,5 % общего количества лет). Точно таким же числом лет характеризуются 2-я и 6-я группы (низкая и высокая водность).

Таким образом, низкая или высокая водность на оз. Байкал — такое же обычное явление, как и нормальная (средняя). К этим трем группам относятся каждые два года из трех лет наблюдений, к промежуточным (группы 3 и 5) — 22 и 13 лет соответственно. Экстремально низкая и экстремально высокая водность (группы 1 и 7) отмечаются достаточно редко: к первой относятся 6 лет (1898, 1903, 1972, 1979, 2014, 2015 гг.), ко второй — 5 лет (1932, 1938, 1973, 1985, 1988 гг.) или 7 лет (с учетом 1869 и 1870 гг.).

Каждый из маловодных или многоводных периодов имеет различную продолжительность и может включать в себя годы из разных групп водности, в том числе нормальной. Принципиальное их от-

Таблица 2

Показатели водности оз. Байкал за 1886–2015 гг.

Номер группы	Показатель водности	Обеспеченность, %	Полезный приток, км <sup>3</sup> /год
1	Экстремально низкая	95–99 и выше	27,1–40,9
2	Низкая	75–95	40,9–51,8
3	Пониженная	60–75	51,8–56,3
4	Нормальная (средний по водности год)	40–60	56,3–62,2
5	Повышенная	25–40	62,2–67,5
6	Высокая	5–25	67,5–80,6
7	Экстремально высокая	1–5 и ниже	80,6–113,4

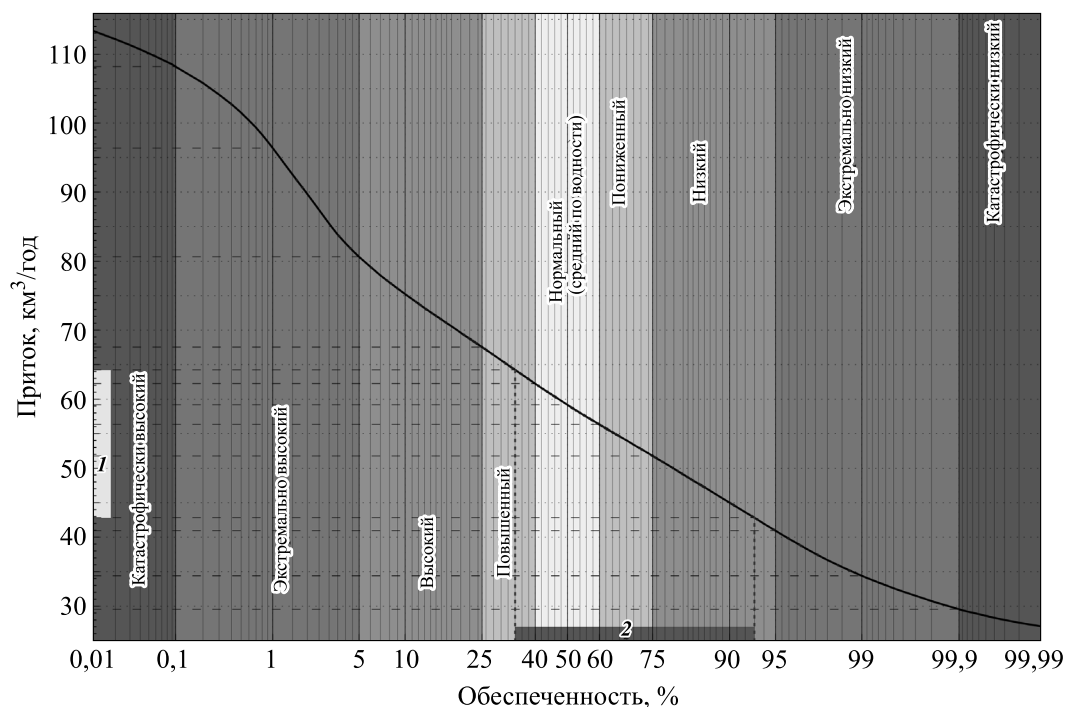


Рис. 4. Обеспеченность полезного притока оз. Байкал за период 1886–2015 гг.

1 и 2 — показатели годового притока и обеспеченности, гарантирующие выполнение Постановления Правительства РФ № 234 от 26.03.2001 г. [24].

личие заключается в доле лет с пониженной, низкой, экстремально низкой водностью, их последовательности и наоборот.

*Маловодные периоды*, как правило, являются следствием перемен в процессах циркуляции атмосферы, сопровождающихся повышенным давлением, положительными аномалиями летних температур и отрицательными аномалиями осадков, понижением стока рек бассейна оз. Байкал и прилегающих территорий в летний период, а также глобальными изменениями климата. Можно отметить маловодные периоды 1976–1982 и 1996–2015 гг.

Маловодье 1976–1982 гг. характеризовалось отрицательной аномалией осадков в летние месяцы на обширной территории от южной части оз. Байкал до Северного Ледовитого океана. В течение шести лет подряд наблюдался низкий и экстремально низкий (1979 г.) приток в озеро со среднегодовым значением 45,5 км<sup>3</sup> за период (77 % от нормы).

Маловодный период 1996–2015 гг. состоит из более продолжительного и мягкого маловодья 1996–2013 гг. и короткого и жесткого — 2014–2015 гг. В 1996–2013 гг. среднегодовой приток в озеро составил 54,1 км<sup>3</sup>, или 91 % от нормы. Аномалия летних осадков фиксировалась главным образом в южных (бассейн Селенги) и центральных частях бассейна оз. Байкал. В северной же части и в бассейне Ангары количество осадков было выше нормы.

Одной из причин современного маловодного периода в бассейнах Селенги и Байкала начиная с 1999 г. является также ослабление влияния юго-восточных муссонов, с которыми связаны переносы большого количества влаги. Ослабления муссонных переносов имели место и в предыдущие десятилетия, однако они не были такими продолжительными и не сопровождались крупномасштабными колебаниями темпера-

Таблица 3  
Обеспеченность среднегодового полезного притока в оз. Байкал для разных условий водности за 1886–2015 гг.

Обеспеченность, %	Полезный приток, км <sup>3</sup> /год
0,01	113,4
0,1	108,2
1	96,4
5	80,6
10	75,2
20	69,6
25	67,5
40	62,2
50	59,2
60	56,3
75	51,8
80	49,9
90	45,0
95	40,9
97	38,4
99	35,4
99,9	29,6
99,99	27,1

турного фона в регионе [25]. В последние десятилетия положительные аномалии температуры и отрицательные аномалии осадков преобладали на большей части Северного полушария, что связано с глобальными климатическими изменениями, в том числе с потеплением в Арктике [26, 27].

В 2014–2015 гг. наряду с пониженным стоком р. Селенги одновременно произошло сокращение стока рек северной части бассейна оз. Байкал при отрицательных аномалиях осадков на всей территории бассейна. Это привело к экстремальному маловодью со снижением притока до 65 % от нормы в 2014 г. и 59 % в 2015 г. Как и в 1976–1982 гг., жесткий характер маловодья последних двух лет связан с повторяемостью (серией) лет экстремально низкой водности, зависимостью от условий предшествующего года (лет), оказывающей негативное влияние на экосистему, водопользователей и водопотребителей на восточном побережье озера и особенно в нижнем бьефе Иркутской ГЭС.

Под нижним бьефом Иркутской ГЭС подразумевается зона бесподпорного участка Ангары от плотины ГЭС до сопряжения с Братским водохранилищем, протяженностью около 100 км. Эта территория исторически наиболее освоена, с высокой плотностью промышленных предприятий и населения (около 1 млн чел.). В русле Ангары находятся многие водозаборы, обеспечивающие водоснабжение предприятий, ТЭЦ, социальных объектов и населения. Суммарный объем промышленного и коммунально-бытового водопотребления на данном участке составляет более 1,5 км<sup>3</sup>/год. Основные водопользователи — водный транспорт и энергетика. Требования судоходства обеспечиваются гарантированными попусками Иркутской ГЭС в нижний бьеф в период навигации, среднесуточными расходами 1500 м<sup>3</sup>/с для обеспечения проектных судоходных глубин (2,4 м). В современных условиях для обеспечения проектных судоходных глубин требуются попуски не менее 1600–1700 м<sup>3</sup>/с. В действительности, в маловодные периоды не выполняются даже минимальные требования водного транспорта, как это было в период экстремального маловодья 2014–2015 гг. Так, в навигацию 2015 г. было отменено движение судов на подводных крыльях, имеющих социальное значение. Также значительно (на 30 % и более) снизилась выработка электроэнергии на Иркутской и других ГЭС Ангарского каскада.

Основным же фактором риска при регулировании уровенных режимов оз. Байкал в маловодные периоды является необходимость устойчивой работы водозаборов и связанного с этим поддержания минимального расхода воды в нижнем бьефе Иркутской ГЭС. Бесперебойная работа водозаборов в настоящее время обеспечивается поддержанием расходов в нижний бьеф Иркутской ГЭС в объеме 1300 м<sup>3</sup>/с (1250 м<sup>3</sup>/с в период ледостава), учитывающих их минимальные проектные отметки.

Техническим проектом Иркутского гидроузла (1951 г.) было предусмотрено минимальное значение расхода воды в нижнем бьефе 1050 м<sup>3</sup>/с. Однако по опыту эксплуатации Иркутской ГЭС и проверки работы водозаборов при пониженных расходах уже в начале 1980-х гг. (в конце экстремального маловодья 1976–1982 гг.) оно было пересмотрено, и в действующих до сих пор правилах использования водных ресурсов Иркутского водохранилища в качестве минимально допустимого значения принят расход 1300 (1250) м<sup>3</sup>/с [28].

Основная причина повышения минимально допустимых расходов в нижнем бьефе для обеспечения требований водозаборов и водного транспорта — просадка уровней как следствие значительного изменения русла реки, рельефа дна и площади сечения (средней ширины и глубины) по всему участку нижнего бьефа, включая устья притоков. Просадка привела к обмелению пойменных протоков, укрупнению островов, уменьшению глубины на перекатах, ухудшению условий работы водозаборов. Изменение русла, в свою очередь, связано с длительным (1953–1990 гг.) периодом крупномасштабной карьерной разработки песка и гравия, а также дноуглубительных работ.

В результате за это время произошли весомые перемены: средняя ширина русла Ангары увеличилась на 73 м, средняя глубина — на 0,7 м, а общий объем русла по всему участку нижнего бьефа увеличился на 66 млн м<sup>3</sup> относительно его естественного состояния в начале 1950-х гг. [29]. Этот фактор, безусловно, оказывает влияние на работу водозаборов при продолжительном периоде минимальных расходов. Критическое значение для расхода воды — 1300 м<sup>3</sup>/с — было подтверждено при эксплуатации водозаборов нижнего бьефа в осенне-зимний период 2014–2015 гг., когда в отдельные дни были зафиксированы отметки уровня воды, близкие к аварийным значениям.

*Многоводные периоды* сопровождаются повышенной или экстремальной водностью на Селенге и других реках бассейна оз. Байкал, отрицательными аномалиями давления, а также повышенной циклонической и муссонной активностью с переносом теплой влаги из южной и восточной частей Тихого океана. Наиболее характерными периодами многоводья были 1930–1942 и 1983–1995 гг. Первый до сих пор остается самым многоводным и продолжительным за все время непрерывных наблюдений (1886–2015 гг.), в 1932 г. зафиксирован максимальный годовой приток — 102,8 км<sup>3</sup>.



Основные риски многоводных периодов связаны с пропуском паводков через Иркутскую ГЭС. В соответствии с техническим проектом Иркутского гидроузла, его пропускная способность в случае катастрофических паводков составляет 7120 м<sup>3</sup>/с. В остальных ситуациях расчетный максимально допустимый сбросной расход в нижний бьеф ограничен 6000 м<sup>3</sup>/с. На практике уже в первой половине 1980-х гг. максимальный расход, обеспечивающий безопасность застройки, расположенной в пойменной части г. Иркутска, составлял 4000 м<sup>3</sup>/с. В современных условиях затопление объектов в нижнем бьефе Иркутской ГЭС отмечалось уже при расходах более 2800–3000 м<sup>3</sup>/с [18].

При этом риски затопления определяются не только притоком в оз. Байкал, но и паводками — расходами р. Иркут и других притоков Ангары. Наиболее опасно совпадение паводка на р. Иркут и высокой водности на Байкале, как это наблюдалось в 1971 г., когда в начале августа в течение нескольких дней расход на Ирките достиг 4800 м<sup>3</sup>/с, а его уровень поднялся на 5 м. Для предотвращения катастрофических затоплений г. Иркутска в этот период потребовалось в экстренном порядке значительно снизить сбросные расходы через Иркутскую ГЭС.

На основе современной информации о рельефе и объектах нижнего бьефа в ИСЭМ СО РАН совместно с Институтом динамики систем и теории управления СО РАН было выполнено моделирование границ зон затопления при разных расходах через гидротехнические сооружения Иркутской ГЭС с учетом расхода р. Иркут [30]. Наибольшей опасности затопления подвержены низменные участки территории г. Иркутска. Так, площадь затопления на участке от плотины Иркутской ГЭС до устья р. Китой при расходе через Иркутскую ГЭС 3000 м<sup>3</sup>/с составит 2065 га, из них 108 га приходится на территории, занятые жилыми домами, дачными и садовыми участками. При расходе 4700 м<sup>3</sup>/с (максимально возможный расход при НПУ = 457 м ТО) затопляется уже 4790 га, в том числе 215 га — территории населенных пунктов. При максимально допустимых расходах 6000 м<sup>3</sup>/с (с учетом расхода р. Иркут) в зону затопления попадают 8910 га, включая 830 га населенных пунктов (в основном в границах Иркутска) и 1065 га объектов инфраструктуры. С учетом участка нижнего бьефа от устья р. Китой до устья р. Белая общая площадь затоплений составит 12 670 га.

Риски затоплений в нижнем бьефе Иркутской ГЭС в периоды высокой водности существенно выросли после принятия в 2001 г. Постановления Правительства РФ № 234 [24] об ограничении притока регулирования уровня оз. Байкал метровым диапазоном (в два раза меньше диапазона, наблюдаемого в природных условиях и предусмотренного техническим проектом ГЭС). Это приводит, согласно действующим правилам, к неизбежным холостым сбросам и, соответственно, затоплениям при достижении отметки 457 м ТО. Выполненные нами расчеты показывают, что законодательно утвержденный метровый диапазон регулирования имеет обеспеченность 34 % (соответствует притоку 64,2 км<sup>3</sup>) по верхней границе и 93 % (42,8 км<sup>3</sup>) по нижней (см. рис. 4). Таким образом, допустимая верхняя граница может быть обеспечена только в 66 годах из 100, и превышение отметки 457 м происходит не только при экстремально высокой, но и при повышенной водности. Затопления в условиях экстремально высокой водности могут иметь продолжительность 4–6 месяцев, что влечет неизбежный значительный ущерб в нижнем бьефе Иркутской ГЭС.

Таким образом, можно утверждать, что зафиксированный в последние годы маловодный период на оз. Байкал не уникален. В прошлом наблюдались не менее длительные и глубокие маловодья. Они, наряду с многоводными периодами, являются частью многолетних циклических природных колебаний — вековых и внутривековых циклов водности, отличающихся продолжительностью и величиной отклонений от средних многолетних значений. При этом низкая и высокая водность на оз. Байкал — такое же обычное событие, как и нормальная (средняя).

В то же время риски, связанные с использованием и регулированием водных ресурсов оз. Байкал в маловодные и, особенно, многоводные годы, обусловлены и действующим законодательством. Необходимо внесение в законы соответствующих изменений и дополнений, учитывающих возможность оперативной адаптации управления к складывающимся гидрометеорологическим условиям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спафарий Н. Г. Путешествие через Сибирь от Тобольска до Нерчинска и границ Китая в 1675 году. Дорожный дневник, репр. изд. 1882 г. — СПб.: Альфарет, 2010. — 214 с.
2. Дыбовский Б. И., Годлевский В. А. Об измерении глубины озера Байкал // Изв. Сиб. отд. РГО. — 1872. — Т. 11, № 5. — С. 6–16.
3. Дыбовский Б., Годлевский В. Физико-географические исследования на Байкале // Труды Вост.-Сиб. отд. РГО. — 1897. — № 1, вып. 1. — С. 1–62.

4. Орлов А. П. О бывших в 1869 г. чрезмерных наводнениях в Забайкальской области // Изв. Сиб. отд. РГО. — 1870. — Т. 1, № 1. — С. 12–22.
5. Орлов А. П. Об изменении уровня Байкала // Труды Вост.-Сиб. отд. РГО. — 1897. — № 1, вып. 1. — С. 63–118.
6. Вознесенский А. В. Об изменении уровня Байкала по наблюдениям 1888–1896 гг. в с. Лиственичное // Труды Вост.-Сиб. отд. РГО. — 1897. — № 1, вып. 1. — С. 146–182.
7. Вознесенский А. В. Очерк климатических особенностей Байкала. — СПб.: Т-во Р. Голике и А. Вильборг, 1907. — 159 с.
8. Шостакович В. Б. Уровень Байкала и Ангары // Труды Иркут. магнит. метеорол. обсерватории. — Иркутск, 1926. — № 1. — С. 31–47.
9. Иркутская гидроэлектростанция на р. Ангаре // Технический проект. Т. 1: Природные условия. Ч. 2: Гидрологический очерк. — М.: Моск. отд.-ние Ин-та Гидроэнергопроект, 1951. — 220 с.
10. Лопатин Г. В. Многолетние колебания уровня Байкала // Труды Байкал. лимнол. станции. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1957. — Т. 15. — С. 5–31.
11. Афанасьев А. Н. Водный баланс оз. Байкал // Труды Байкал. лимнол. станции. Т. 18: Исследования гидрологического режима Байкала. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. — С. 7–154.
12. Афанасьев А. Н. Водные ресурсы и водный баланс бассейна оз. Байкал. — Новосибирск: Наука, 1976. — 238 с.
13. Синокович В. Н. Реконструкция естественного уровня режима озера Байкал после строительства Иркутской ГЭС // Метеорология и гидрология. — 2005. — № 7. — С. 70–76.
14. Синокович В. Н., Кучер К. М. Некоторые результаты изучения уровня озера Байкал с использованием измерительных систем разного поколения // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. — Вып. 1. — С. 221–225.
15. Дружинин И. П., Коноваленко З. П., Кукушкина В. П., Хамьянова Н. В. Речной сток и геофизические процессы. — М.: Наука, 1966. — 295 с.
16. Дружинин И. П., Смага В. Р., Шевнин А. Н. Динамика многолетних колебаний речного стока. — М.: Наука, 1991. — 176 с.
17. Савельев В. А. Современные проблемы и будущее гидроэнергетики Сибири. — Новосибирск: Наука, 2000. — 199 с.
18. Бычков И. В., Никитин В. М. Регулирование уровня озера Байкал: проблемы и возможные решения // География и природ. ресурсы. — 2015. — № 3. — С. 5–16.
19. Никитин В. М., Савельев В. А., Бережных Т. В., Абасов Н. В. Гидроэнергетические проблемы озера Байкал: прошлое и настоящее // Регион: экономика и социология. — 2015. — № 3 (87). — С. 273–295.
20. Молотов В. С. Совершенствование гидравлического режима озера Байкал с учетом экологических требований: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: Изд-во Моск. ун-та природообустройства, 1997. — 27 с.
21. Гидроэнергетика и состояние экосистемы озера Байкал / Отв. ред. А. К. Тулохонов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. — 280 с.
22. Davi N. K., Jacoby G. C., Curtis A. E., Baatarbileg N. Selenge river, Mongolia streamflow reconstruction // IGBP PAGES, World Data Center for Paleoclimatology. — Boulder CO, USA, 2006. — Vol. 19. — P. 288–299.
23. Кротов В. А. Летопись города Иркутска 1652–1856 гг. — Иркутск: Сиб. книга, 2013. — 448 с.
24. Постановление Правительства РФ № 234 от 26.03.2001 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности» [Электронный ресурс]. — <http://pravo.gov.ru/ispdata/?docbody=&nd=102070283> (дата обращения 13.04.2016).
25. Бережных Т. В., Марченко О. Ю., Абасов Н. В., Мордвинов В. И. Изменение летней циркуляции атмосферы над Восточной Азией и формирование длительных маловодных периодов в бассейне реки Селенги // География и природ. ресурсы. — 2012. — № 3. — С. 61–68.
26. Абасов Н. В., Бережных Т. В., Ветрова В. В. Исследование влияния Арктики на гидроэнергетический потенциал Ангарского каскада ГЭС // Труды Брит.-рос. конф. «Гидрологические последствия изменения климата». — Барнаул: Изд-во «Пять плюс», 2009. — С. 42–49.
27. Кононова Н. К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б. Л. Дзердзеевскому. — М.: Воентехиниздат, 2009. — 372 с.
28. Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского). — М.: Изд-во М-ва мелиорации и водного хозяйства РСФСР, 1988. — 52 с.
29. Мазур Г. С. Просадка уровней в нижнем бьефе Иркутской ГЭС // Материалы науч. чтений «Солнце, Земля, вода и энергия»: Труды Вост.-Сиб. отд.-ния АПВН. — Новосибирск: Наука, 2005. — Вып. 2. — С. 118–129.
30. Абасов Н. В., Осипчук Е. Н., Никитин В. М., Бережных Т. В. Формирование и визуализация зон затопления в нижнем бьефе Иркутской ГЭС // Актуальные проблемы науки Прибайкалья. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015. — Вып. 1. — С. 6–12.

*Поступила в редакцию 26 апреля 2016 г.*