

ИССЛЕДОВАНИЯ В БАСЕЙНЕ БАЙКАЛА

УДК 551.4.042 (571.5)

DOI: 10.15372/GIPR20250207

О.И. БАЖЕНОВА*, Е.М. ТЮМЕНЦЕВА**

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, bazhenova_o49@mail.ru

**Иркутский государственный университет,
664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия, tumentzeva.liz@yandex.ru

МОНИТОРИНГ НИСХОДЯЩЕЙ ВЕТВИ ЛИТОДИНАМИЧЕСКОГО КРУГООБОРОТА ВЕЩЕСТВА В БАЙКАЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЕ

Рассмотрены закономерности проявления экзогенных процессов в Байкальской котловине, установленные по данным мониторинга их многолетней динамики. В основу анализа положена обширная база данных, полученных на западном, южном и восточном побережьях Байкала. Методы исследования включали экспериментальные наблюдения (стоковые площадки, метод реперов, пылеуловителей и др.) на репрезентативных участках, дешифрирование космоснимков, аэрофотосъемки с дистанционно пилотируемых летательных аппаратов. Основное внимание уделено таким характеристикам, как скорость процессов, направление и объем перемещаемого вещества в результате схода селей, формирования оползней, абразии берегов, деятельности водных и ветровых потоков. Показана временная организованность экзогенных процессов, проявляющаяся в четко выраженной ритмичности их хода, контролируемой изменением вековых и внутривековых циклов водности оз. Байкал. Установлено, что для маловодных периодов характерна высокая интенсивность эоловой миграции вещества. Детальные наблюдения в последний маловодный период зафиксировали ее среднюю величину, составляющую 500 г/м². Во многоводные периоды активны эрозионные процессы, фиксируется сход селей и оползней, происходит размыв берегов. Интенсивный сход селей отмечался в 1930–1938, 1960–1962 и 1968–1972 гг., с максимумом в 1971 г., когда суммарный объем сноса со склонов по долинам рек между городами Байкальском и Слюдянкой составил более 1 млн м³ рыхлой породы. Полученные результаты позволяют прогнозировать дальнейший ход процессов и минимизировать негативные последствия их проявления.

Ключевые слова: современная рифтовая зона, внутривековая цикличность, сели, сток наносов, абразия берегов, оползни, эоловая миграция вещества.

O.I. BAZHENOVA*, E.M. TYUMENTSEVA**

*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, bazhenova_o49@mail.ru

**Irkutsk State University, 664003, Irkutsk, ul. Karla Marksa, 1, Russia, tumentzeva.liz@yandex.ru

MONITORING OF THE DESCENDING BRANCH OF THE LITHODYNAMIC CIRCULATION OF MATTER IN THE BAIKAL BASIN

The article considers the regular patterns of exogenous processes manifestation in the Baikal basin, established on the basis of monitoring data of their long-term dynamics. The analysis is based on an extensive database obtained on the western, southern and eastern shores of Lake Baikal. The research methods included experimental observations (runoff sites, benchmark method, dust collectors, etc.) on representative sites, interpretation of space images, and aerial photography from remotely piloted aircrafts. The main attention is paid to such characteristics as the rate of processes, direction and volume of transported matter as a result of mudflows, landslides, coastal abrasion, and the activity of water and wind flows. The article shows temporal organization of exogenous processes, expressed in a pronounced rhythmicity of their course, controlled by changes in secular and intra-secular cycles of water content in Lake Baikal. It is established that low-water periods are characterized by high in-

tensity of aeolian migration of matter. Detailed observations during the last low-water period recorded its average value of 500 g/m². During high-water periods, erosion processes are active, mudflows and landslides are recorded, and shore erosion occurs. Intensive mudflows were recorded in 1930–1938, 1960–1962, and 1968–1972, with a maximum in 1971, when the total volume of drift from the slopes along the river valleys between the towns of Baikalsk and Slyudyanka amounted to more than 1 million m³ of loose rock. The results obtained make it possible to predict the further course of processes and minimize the negative consequences of their manifestation.

Keywords: *modern rift zone, intra-secular cyclicity, mudflows, sediment runoff, coastal erosion, landslides, aeolian migration of matter.*

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании Байкальской котловины следует учитывать, что она находится в пределах современной рифтовой зоны. Это важно иметь в виду при решении проблем рационального природопользования, сохранения природного разнообразия и устойчивого регионального развития. Байкальский рифт характеризуется чрезвычайно высокой активностью литодинамического круговорота вещества и энергии, который включает восходящую эндогенную и нисходящую экзогенную ветвь [1]. Периодически экзогенные процессы в Байкальской котловине в условиях интенсивных тектонических и сейсмических воздействий, колебаний климата, а также хозяйственной деятельности приобретают разрушительный, даже катастрофический характер [2, 3].

Изучением процессов, происходящих в Байкальской рифтовой зоне, длительное время занимаются многие институты СО РАН. Чаще всего работы проводятся на отдельных участках — полигонах. Результаты этих исследований были обобщены Б.П. Агафоновым [2] в форме монографии, не теряющей своей актуальности и в настоящее время. По его оценкам ежегодный снос вещества в оз. Байкал в среднем составляет 15 млн т, половина этого объема поступает в растворенном виде. Второе место по вкладу вещества в Байкальскую котловину занимают взвешенные наносы, поступающие с речным стоком — почти 3 млн т. Большой объем вещества в озеро выносится селевыми потоками, обвалами, осыпями, оползнями, поступает в результате абразии берегов, чему способствует высокая сейсмическая активность региона [2]. Вместе с тем движение поверхностного вещества земной коры, заряженного энергией Солнца, имеет волновой (циклический) характер [4–6], отличается разнообразием механизмов, что вызвано большим набором факторов. В связи с этим для управления ходом экзогенных процессов, минимизации ущерба от их проявления необходимо разбираться в закономерностях их развития в особых тектонических условиях современных рифовых зон. Такие знания чрезвычайно важны для прогнозной оценки современного морфолитогенеза [7]. К настоящему времени разработаны методы долгосрочного прогнозирования изменения земной поверхности [7], исследованы закономерности природных явлений, накоплен богатый фактический материал, который позволяет нам оценить ход экзогенных процессов в Байкальской котловине во времени. В центре нашего внимания — изучение процессов, которые относятся к числу наиболее активных и длительно изучаемых: это сели, оползни, абразия берегов, флювиальные и эоловые процессы. Цель исследования — мониторинг этих пяти групп экзогенных процессов на ключевых участках, расположенных на западном, южном и восточном побережьях Байкала, включая дельты рек.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дельта р. Селенги выбрана сотрудниками Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (Иркутск) в качестве основного исследовательского полигона, на котором проводятся наблюдения за переформированием не только руслового рельефа протоков [8, 9], но и за морфолитодинамикой всей дельты как крупной формы рельефа. В рамках международного проекта здесь создана мониторинговая сеть репрезентативных точек наблюдений, оборудованных реперами [10].

Исследователями большое внимание также уделяется дельте р. Голоустной, природные комплексы которой в последние годы подвержены высокой степени антропогенного влияния. В дельте р. Голоустной уже много лет на базе студенческой практики преподавателями Иркутского государственного университета (ИГУ) с участием студентов проводятся режимные наблюдения за переносом вещества эоловыми процессами, плоскостным флювиальным и зоогенным сносом и оценивается влияние на их ход антропогенной деятельности [11]. С 2006 г. исследования проводятся ежегодно на ключевом профиле протяженностью 820 м от горы Подгорной до русла рукава р. Голоустной, а также прокладывались маршруты в типичные геосистемы устьевой аккумулятивной равнины. Кроме комп-

лексных ландшафтных наблюдений изучались отдельные компоненты — от рельефа до животного мира. Большое внимание уделялось особенностям функционирования современных геосистем, в ходе которого происходит интенсивная миграция вещества. Наблюдения проводились на экспериментальных геоморфологических площадках, закладывались почвенные разрезы, изучалась структура травостоя, видовое разнообразие, биологическая продуктивность [11].

Институтом Земной коры СО РАН продолжаются детальные исследования береговых процессов оз. Байкал [12]. На ключевых участках выполнено дешифрирование береговой зоны и проведен сравнительный анализ разновременных аэрофото- и космоснимков. Это позволило проследить динамику изменений положения береговой линии во времени. Для детального исследования рельефа береговой зоны применялась также аэрофотосъемка, выполненная с дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА), служивших для получения аэрофотоснимков с разрешением 3840×2160 пикселей. Полеты запрограммированы при помощи специальных программных инструментов. Высота съемки составила 100 м над уровнем оз. Байкал. Выполненные работы позволили создать высококачественные ортофотоснимки и трехмерные модели ключевых участков [12]. Изучению абразии берегов большое внимание уделяется также сотрудниками Геологического института им. Н.Л. Добреева СО РАН (Улан-Удэ) [13] и Байкальского института природопользования СО РАН (Улан-Удэ) [14].

Кроме академических институтов и государственных университетов, в мониторинге принимают участие также АО «Иркутскгеофизика» и государственное предприятие «Республиканский аналитический центр» [15]. Ими в 2015 г. были обследованы оползневые явления на о. Ольхон, обвальнo-осыпные склоны на Кругобайкальской железной дороге и бассейн р. Большой Осиновки с целью оценки селеопасности для карт шлам-лигнина, расположенных в устье реки. Выполнены детальные наблюдения за селевыми явлениями на участке в районе г. Слюдянки.

Сеть наблюдения за развитием экзогенных геоморфологических процессов в пределах Республики Бурятия в 2015 г. состояла из девяти участков. Режимные наблюдения проводились за гравитационно-эрозионными процессами на р. Селенге (участок Сужа) и на побережье оз. Байкал (участки Боярский, Оймур-1 и Оймур-2). В последние годы исследователями при получении информации об ареалах распространения, механизмах и интенсивности многих экзогенных процессов, прежде всего селей, используются беспилотные летательные аппараты [12, 16]. В результате этих работ получена детальная база данных, которая легла в основу нашей оценки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Флювиальные процессы. Деятельность водных (флювиальных) потоков в Байкальской котловине очень разнообразна, отличается высокими скоростями и большим объемом перемещаемого вещества. По оценкам Б.П. Агафонова [2], в среднем со стоком рек в Байкал ежегодно выносятся 7929 тыс. т растворенного вещества, 2955 тыс. т взвешенного и 917 тыс. т влекомого материала.

Средний годовой сток наносов в дельте Селенги за период с 1947 по 1967 г. составлял 2,39 млн т, максимальный объем отмечался в 1961 г. — 2,9 млн т [17]. Основные объемы наносов (до 60 %) по р. Селенге проходят летом, доля весеннего стока — менее 40 % годового объема. Для этой реки сезонное распределение стока наносов совпадает с сезонным распределением стока воды, поэтому определяющим фактором в формировании стока наносов является водный режим реки, процессы русловой эрозии и дождевой смыл со склонов. По официальным данным, за последние годы [15] сток взвешенных веществ в оз. Байкал с водами р. Селенги носит неравномерный характер, изменяясь в широких пределах от 0,3 до 1,3 млн т. Рассчитанные объемы стока за период экспериментальных наблюдений в дельте коррелируют с данными сети наблюдений Росгидромета.

Нами исследованы временные ряды стока наносов основных рек сельскохозяйственных районов Байкальской природной территории — Селенги и Баргузина [18]. Следует подчеркнуть, что эти реки являются основными поставщиками загрязняющих веществ в оз. Байкал в твердом и растворенном виде. Анализ многолетней динамики стока воды и взвешенных наносов данных рек за вторую половину XX в. выявил четко выраженную цикличность их хода, обусловленную ритмическими колебаниями атмосферного увлажнения. Установлено, что фазам повышенной водности рек соответствуют циклы высокого стока взвешенных наносов, указывающие на рост интенсивности эрозионных процессов (рис. 1). Активизация эрозионной деятельности в эти периоды связана как с ростом эрозионной опасности ливней (бассейновая плоскостная и овражная эрозия), так и с увеличением скорости русловых деформаций.

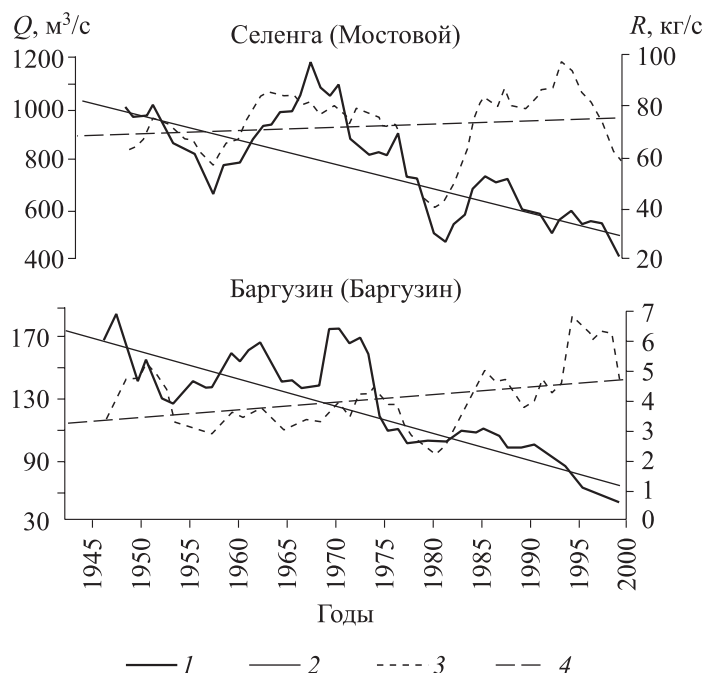


Рис. 1. Многолетняя динамика расходов воды (Q) и взвешенных наносов (R) в бассейне оз. Байкал, по [18].

Расходы наносов: 1 — сглаженные по пятилетиям, 2 — линейный тренд. Расходы воды: 3 — сглаженные по пятилетиям, 4 — линейный тренд.

Изменение интенсивности бассейновой эрозии во времени контролируется не только климатическими колебаниями, но и антропогенной деятельностью. В рассматриваемых бассейнах отмечается снижение стока наносов ввиду затишья эрозийных процессов в последние 50 лет, что связано с консервацией сельскохозяйственных земель [19].

По данным Е.А. Ильичевой и др. [9], диапазон значений измеренной мутности за период исследований изменяется по пространству дельты Селенги в различные годы и сезоны от 220 до 4,5 г/м³. Мутность

селенгинских вод при входе в дельту колеблется от 16 до 95 г/м³. Максимальный сток взвешенных наносов (2,5 млн т) отмечался в паводок 2012 г., минимальные объемы поступили в 2007 и 2011 гг. В июле 2013 г. была проведена съемка наносов по всем протокам дельты с периодичностью отбора проб на фильтрование 2–3 км. На основе ежегодно получаемых данных о мутности установлено, что изменения концентраций взвешенных веществ в дельте от года к году могут отличаться в 2–3 раза в зависимости от водности в вершине дельты. Шлейфы мутности иногда распространяются до 5 км в Байкал [20]. Увеличение концентраций на устьевых участках проток Левобережная, Харауз, Галутай, Среднеустье, Колпинная и в мелководных заливах обусловлено волновой деятельностью Байкала и нагонными явлениями, вызывающими перемешивание текучих вод и взмучивание руслоформирующих наносов. Отмечено значительное увеличение мутности на внутридельтовых узлах бифуркации, на участках подмываемых берегов и размываемых островов и осередков. Шлейфы повышенной мутности прослеживаются от 500 до 1000 м от источников поступления материала [20].

Сели и оползни. Селевая активность в Байкальской рифтовой зоне изучена за последние три столетия [21, 22]. По охваченной селями площади и при четкой сохранности их следов, свидетельствующих о значительной мощности потоков, выделяются 1871 и 1971 гг. Интервал в 100 лет между катастрофическими событиями позволяет предположить, что они связаны не только с высоким увлажнением, но и с выявленным столетним циклом землетрясений [23]. Поврежденные в 1871 г. деревья обнаружены почти на всем протяжении Станового нагорья — от Байкальского хребта до северо-восточной оконечности хр. Кодар. В 1971 г. мощные и разрушительные селевые потоки прошли практически по всем водотокам Юго-Западного Прибайкалья, в результате чего семь дней не работала Транссибирская железнодорожная магистраль, 20 км путей было смыто в оз. Байкал, повреждено несколько мостов, размыто полотно федеральной автодороги Иркутск — Улан-Удэ, порвана линия кабельной связи. В 1971 г. разрушения были вызваны всеми разновидностями потоков — от мощных грязекаменных до слабых водокаменных, которые образовались на территории от Восточного Саяна до Северо-Муйского хребта при продолжительных аномально бурных июльских ливнях [22].

Селевые ареалы в Прибайкалье, по данным преимущественно дендрохронологического анализа, наиболее четко восстанавливаются и часто проявляются в трех районах — в Восточном Саяне (Тункинские Гольцы), в горном обрамлении южной оконечности Байкала и Северном Прибайкалье, включая Становое нагорье. Наибольшие разрушения инженерных сооружений в XX в. происходили в Южном Прибайкалье, на побережье Байкала (вдоль хр. Хамар-Дабан), которое давно освоено человеком. Здесь наблюдаются грязекаменные и водокаменные сели. Значительные паводки отмечались в 1932, 1934, 1938, 1959, 1960, 1962 и 1965 гг. Наиболее мощным из них, принесшим большой материальный ущерб, был селевой паводок на р. Слюдянка 20 июня 1960 г. [22]. На других, промежуточ-

ных горных участках встречаются следы редких, единичных, сравнительно маломощных селей. Вероятность прохождения одного и того же гидрометеорологического события в одном водосборном бассейне за короткий промежуток времени весьма невелика, так как повторяемость выпадения интенсивных осадков часто не совпадает во времени и пространстве. Такая ситуация сложилась в 1962 г., когда селевые потоки в горном обрамлении оз. Байкал формировались в разных местах с июня по август.

Прослеживается периодичность в увеличении и уменьшении площадей проявления селей. В 1910–1931 гг. отмечалось снижение селевой активности (случаи возникновения селей единичны). С середины 1930-х гг. наблюдается положительный тренд атмосферных осадков, одновременно усиливается солнечная активность. В целом селевая деятельность в Северном Прибайкалье в 84 % случаев приходится на ветвь спада солнечной активности и в 16 % — на ветвь ее подъема. Замечено, что значительная часть селепроявлений в одни и те же годы отмечена в двух или трех районах их обычного проявления (например, сели 1935, 1942, 1952, 1960, 1962, 1971 гг.), что связано с крупными, охватывающими большие площади в Прибайкалье гидрометеорологическими событиями. Большая часть селей сформировалась за счет сплывов [24]. На склонах по долинам рек и ручьев между Байкальском и Слюдянкой в 1971 г. сформировалось около 150 сплывов объемом в среднем от 3000 до 10 000 м³. Суммарный объем составил не менее 1 млн м³ рыхлой породы (по материалам дешифрирования аэрофотоснимков 1972 г.).

После катастрофических селей 1971 г. селевая активность резко снизилась, и в последние 40 лет на территории Байкальской рифтовой зоны, за редким исключением, она практически не проявлялась. В течение этого периода долины рек преимущественно поросли тополем, осиной, ивой и ольхой. Сформировался маломощный почвенный горизонт. Однако с 2014 г. вновь отмечается повышение селевой деятельности. В 2017–2018 гг. русла ряда селевых рек очистили от древесной растительности во избежание образования древесно-кустарниковых заторов. Благодаря этому русловые потоки воды без задержки выносились в оз. Байкал. Во время прохождения паводка по долинам рек почву снесло в Байкал, и на поверхности опять выступили валунно-галечниковые отложения. На многих реках зафиксирован врез русел в днищах долин на глубину до 1 м. Катастрофические селевые потоки 2014 г. и последующие экстремальные события, включая паводки, прошедшие на исследуемой территории в 2019 г. и вызвавшие в ряде мест наводнения, знаменуют начало смены синоптической обстановки.

Оползневые процессы в Байкальской котловине развиты преимущественно на подрезанных или подмытых склонах и на шлейфах из глинистых и суглинистых отложений по зонам грунтового увлажнения, таяния многолетней мерзлоты, вдоль сейсмостектонических рвов. Опасное проявление оползневых процессов со смещением рыхлых масс непосредственно в Байкал чаще всего обусловлено аномально обильными и затяжными ливнями, вызывающими одновременно и сели, а также интенсивной абразионной подрезкой склонов во время наиболее высоких уровней воды в озере [2, 3]. По данным Б.П. Агафонова, одновременное проявление этих взаимосвязанных причин активизации оползневого процесса наблюдалось в 1932, 1938, 1962, 1964, 1971, 1973, 1985 гг. [2].

Абразия берегов. Общая протяженность береговой линии оз. Байкала составляет 2074,17 км, она представлена структурно-абразионными (717,95 км), абразионными (906,28), аккумулятивными (421,78) и техногенными (28,16 км) берегами [12].

Исследования берегов абразионного типа, выполненные на восточном побережье Байкала, показали, что сильный размыв берегов наблюдается на участках побережья, занятых второй (4–6 м) байкальской террасой, сложенной комплексами аллювиальных, аллювиально-озерных, аллювиально-дельтавиальных и дельтовых отложений песчаного и супесчано-суглинистого состава [3]. Значительный размыв (1,5–3,0 м) характерен также для первой террасы Байкала и низких шлейфов, состоящих из суглинков, песков и глин. Слабее подвержены разрушению те уступы террас, у основания которых обнажаются глинистые неогеновые отложения и коренные породы из кристаллических сланцев и гнейсов. В результате абразионной деятельности и постоянного оползания и оплывания отложений со времени повышения уровня воды берег разрушился, что создало угрозу целостности полотна железной дороги, проходящей вдоль берега Байкала [3].

В зависимости от особенностей геолого-литологического строения и локальной морфологии береговой зоны формирование абразионных берегов сопровождается развитием других береговых процессов.

На восточном побережье Байкала наиболее активное развитие абразия получила в 1962, 1964, 1971, 1973, 1983–1985, 1988, 1990–1994 гг., когда наблюдался наивысший подъем уровня воды в Байкале [3, 13]. В дельте Селенги за 40 лет наблюдений (реперы заложены в 1962 г. А.Б. Иметхеновым)

береговая полоса сдвинулась в сторону суши на десятки метров: в с. Старый Энхэлук на 24,5 м; с. Сухая — 28,7 м; с. Оймур (пристань, створ 1) — 41,6 м; с. Оймур (пристань, створ 2) — 36,25 м; с. Посольск — 41 м; в рыбопункте Поворот — на 82,5 м [25].

Обследование участка берега к югу от Посольского сора, преобразованного абразионными процессами в период штормов осенью 2020 — весной 2021 г., показало, что ширина обрушившегося берега в среднем составляет 2 м [14].

Эоловые процессы. Особенности развития эоловых процессов на побережье Байкала изучали многие геоморфологи: Б.П. Агафонов [2], А.Б. Иметхенов [3], С. Вика, Г.И. Овчинников, В.А. Снытко, Т. Щипек [26]. Наши исследования проводились маршрутными методами в 1993 г. в устьевых частях рек Бугульдейки, Сармы, Анги, в Приольхонье и на Ольхоне. С 2005 г. по настоящее время наблюдения проводятся на научной базе практик ИГУ в районе дельты р. Голоустной. Эоловые процессы в Байкальской котловине действуют круглогодично. Их интенсивность зависит от ветрового режима и наличия земной поверхности без растительного покрова или с разреженным. Для Байкальской котловины характерна сложная система ветров: продольные, поперечные, горно-долинные, бризовые, фёны. Они связаны с глобальной и местной циркуляцией воздушных масс [27].

Самые сильные поперечные ветры северных румбов — северные и северо-западные. Они характеризуются исключительной порывистостью, всегда дуют поперек озера и по сравнению с другими байкальскими ветрами наиболее продолжительные. Годовой дефляционный потенциал ветра или ветровые нагрузки изменяются в среднем от 80 до 120 [28] (для сравнения: дефляционный потенциал ветров на Иркутско-Черемховской равнине в среднем около 20). В годовом режиме нагрузок выделяются три сезонных пика — зимний (ноябрь — декабрь — январь), весенний (апрель, май) и ранне-осенний (сентябрь). Особой силы, до 40 м/с, ветер достигает в долинах рек Сармы и Голоустной. Часто эти ветры называют «байкальская бора». По мнению Т.Т. Тайсаева, именно под воздействием горного ветра — сармы — вдоль западного побережья Байкала возникли сухие каменистые степи с ложинно-грядовым рельефом, котловинами выдувания и сульфатными озерами [29]. В долине р. Бугульдейки северо-западный горный ветер разрушительной силы удерживается до 4 сут. Ветер несет пыль и мелкую гальку, валит людей с ног. В период, когда дует так называемая бугульдейка, местное население не выпускает скот на пастбище. С сильными ветрами связано возникновение пыльных бурь. В районе поселков Большое Голоустное, Хужир ежегодно фиксируется 1–4 пыльные бури. Продолжительность пыльных бурь — от нескольких минут до нескольких часов, но, например, в 2015 г. в Хужире пыльная буря длилась два дня и четыре часа. В отдельные годы, если снежный покров небольшой и имеются очаги дефляции, пылевые бури и пылевые поземки наблюдаются даже зимой (в ноябре и декабре).

Эксперимент, проведенный в районе Академического хребта, показал, что взвешенные вещества в снеге при эоловом зимнем переносе на 45 % состоят из частиц пород западного берега [30]. В минеральном составе взвеси преобладает алюмосиликатное вещество, содержащее основные породообразующие элементы. Материал пыльных бурь обогащен фосфором, никелем, кобальтом и др. Активное воздействие ветровых потоков на геосистемы побережья Байкала вызывают образование эоловых фаций дефляционных и аккумулятивных. Каждое из исследованных эоловых урочищ обладает своей спецификой, и в то же время, развиваясь в специфических байкальских условиях, с постоянным привносом нового материала Байкалом, они имеют ряд общих черт.

Западное побережье озера характеризуется доминированием процессов дефляции. Ветровая денудация имеет здесь площадной характер. Наблюдения на экспериментальных площадках в районе Большого Голоустного показали динамику величины эолового сноса за период с 2006 г. (рис. 2). При нарушении рыхлого покрова мелкозем достаточно быстро уносится ветром и переоткладывается по поверхности прибрежной равнины. Дефляция мелкозема способствует образованию щебнистой или песчаной отмостки на поверхности.

Переивание песчаных толщ и формирование движущихся эоловых форм характерны для западного побережья Ольхона и для восточного побережья Байкала, где встречаются котловины выдувания, дефляционные останцы, дюны. Песчаные образования на Ольхоне имеют эоловое происхождение и приурочены к береговым зонам заливов Малого моря. Эоловые образования на острове отмечаются в двух формах: современные позднеголоценовые (подвижные) и древние раннеголоценовые (зафиксированные). В настоящее время хозяйственная деятельность человека разрушает растительный покров. Это усугубляет природные процессы, ведущие к увеличению полей подвижных песков. Участки современных (подвижных) эоловых песков отмечены на северо-западном побережье острова.

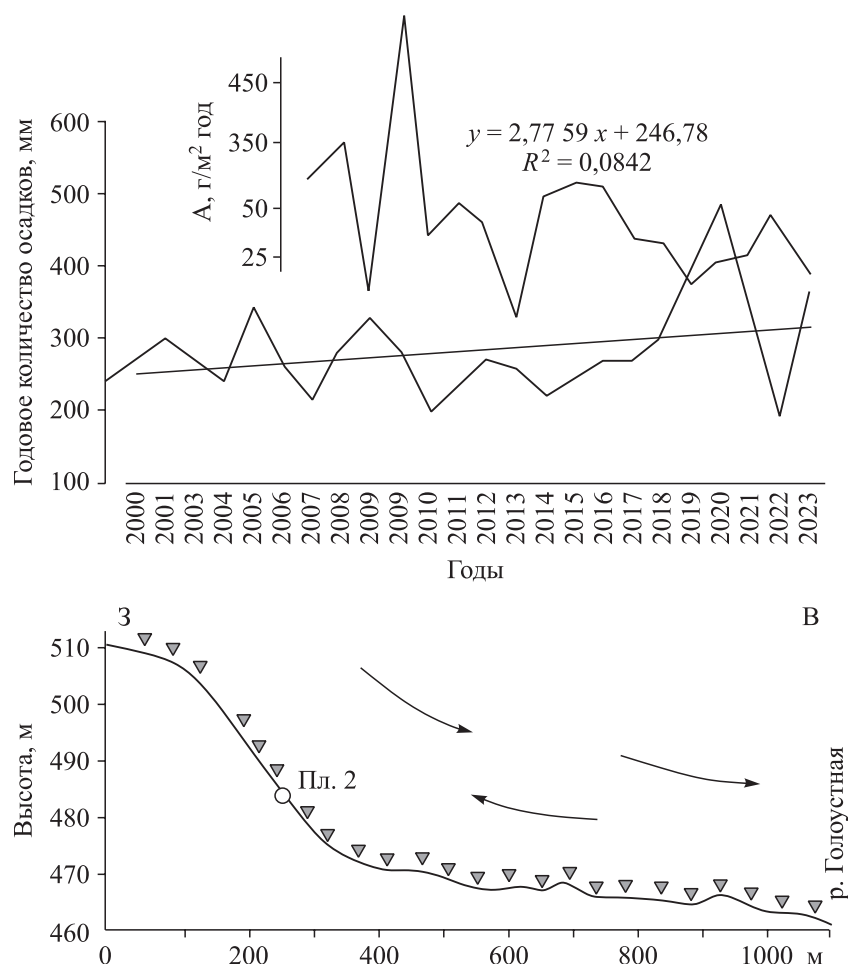


Рис. 2. Изменение модуля эоловой миграции вещества (А) на фоне изменения годового количества осадков (Н) на полигоне-трансекте (площадка 2) в районе пос. Большое Голоустное (юго-западное побережье оз. Байкал).

Стрелками показано преобладающее направление ветра [31].

Наиболее крупными из них являются песчаные массивы Семисосенский, Елгайский, Маломорский, Хужирский, Сарайский, Харанцинский, Улан-Хушинский, Нюрганский. Их площади разные — от 1 до 6 км². Обширные песчаные образования на Ольхоне предопределяют существование экосистем опустыненно-степного типа.

Самые значительные по площади песчаные отложения, не только на о. Ольхон, но и на всем западном побережье Байкала, встречаются в урочище Песчаное, которое расположено в 20 км севернее пос. Хужир и известно песчаными дюнами, холмами и грядами, которые занимают площадь около 3 км². На восточном побережье оз. Байкал широко развиты песчаные гряды высотой 4–6 м, которые наступают на лес, заваливают дороги, кустарники до половины высоты деревьев. В районе губы Каткова при высоте эоловых форм 6 м скорость наступления составляет 3,6 см/год, среднегодовой перенос материала через метровое сечение поверхности — 0,22 м³, в районе губы Малая Сухая скорость наступления составляет 31 см/год [29].

При направлении ветра с Байкала на сушу рыхлый материал перемещается вверх по уклону на склоны Приморского хребта. При направлении ветра в сторону Байкала самые мелкие частицы уносятся и оседают на водной поверхности.

Первые сведения о величине ветрового сноса в Байкальской котловине получены Б.П. Агафоновым [2]. Им в пади Узур на о. Ольхон были зафиксированы максимальные в 1969–1970 гг. значения эоловой аккумуляции (758 г/год), минимальные (68 г/год) за период с 1969 по 1975 г. — в районе Сармы. Измерения показали, что земная поверхность приозерной полосы в местах коридоров продува по-

нижалась от 3,6 до 27,5 мм/год — в среднем на 15,6 мм/год. Величина эоловой аккумуляции, по нашим экспериментальным данным, во влажные годы составляла менее 50 г/м², в умеренно влажные — 50–100 г/м² и в засушливые — 100–500 г/м² [11].

В результате ветрового сноса в оз. Байкал поступает около 180 тыс. т эолового материала в год [32]. Ширина пляжа оз. Байкал около различных очагов развевания в летний период варьирует от 8 до 15 м. С учетом средней величины дефляции, а также ширины пляжей около очагов ветрового развевания и коридоров продува вдоль береговой линии посредством ветровой деятельности из Байкала удаляется приблизительно 6 тыс. м³.

Активное антропогенное воздействие на Байкал в середине XX в. в связи со строительством каскада ГЭС на р. Ангаре обусловило подъем уровня озера на 1 м в течение короткого времени, что нарушило ход эоловых процессов. Постоянное антропогенное использование песчаных берегов Байкала привело к их деградации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Богатый фактический материал по динамике пяти групп процессов, рассмотренный выше, позволяет нам оценить ход экзогенных процессов в Байкальской котловине во времени. В связи с тем, что экзогенным процессам свойственна цикличность, для выявления временной упорядоченности хода экзогенных процессов рассмотрим изменение их интенсивности на фоне колебания водности оз. Байкал. За основу таких колебаний взят график ежегодного скользящего среднего полезного притока в оз. Байкал в период 1886–2015 гг., т. е. за последние 150 лет, построенный сотрудниками Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск) [33]. Полезный приток в озеро ими определялся по данным учета двух главных показателей — расхода воды в истоке Ангары и изменения объема воды в озере в зависимости от динамики среднего уровня воды [33]. В результате ими получен график (рис. 3), который показывает, что полезный приток имеет значительные временные колебания. При среднемноголетнем полезном притоке (норме) 59,2 км³ в год его минимальное значение составило 35,9 км³ в 1903 г. и 35,2 км³ в 2015 г., максимальное — 108,7 км³ в 1869 г. и 102,8 км³ в 1932 г. Для полезного притока, как и для связанного с ним уровня, характерна цикличность колебаний, представленная сочетанием маловодных и многоводных периодов (см. рис. 3).

Маловодные периоды, как правило, являются следствием перемен в процессах циркуляции атмосферы, сопровождающихся повышенным атмосферным давлением, положительными аномалиями летних температур и отрицательными аномалиями осадков, понижением стока рек бассейна оз. Бай-

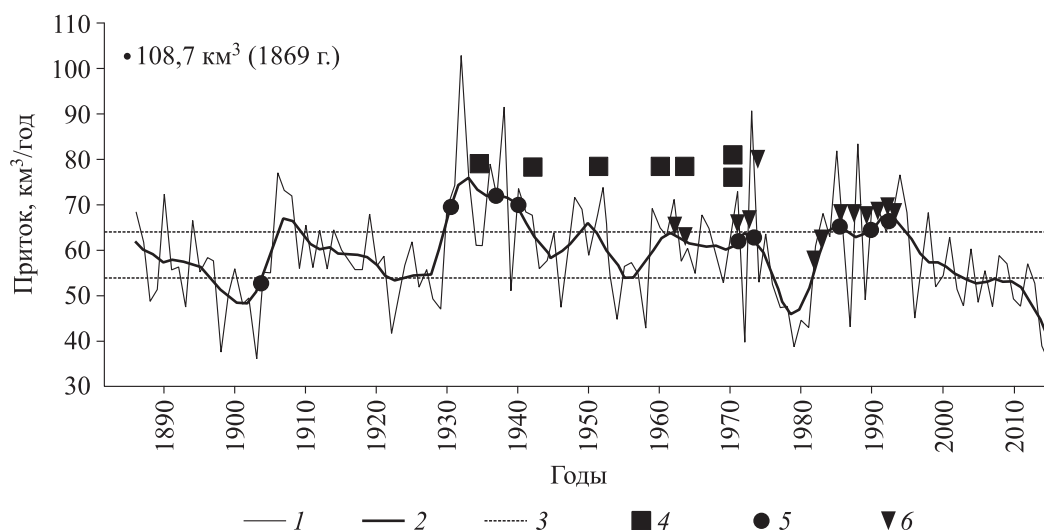


Рис. 3. Активное проявление экзогенных процессов в Байкальской котловине в многоводные периоды оз. Байкал, по [33].

Приток воды в озеро Байкал, по [33]: 1 — полезный приток; 2 — скользящее среднее; 3 — диапазон нормы от среднего значения. Активное проявление процессов в Байкальской котловине: 4 — сели, 5 — оползни, 6 — абразия берегов.

кал и прилегающих территорий в летний период, а также глобальными изменениями климата. Для них характерно значительное повышение интенсивности эоловых процессов (см. рис. 2). Особо следует отметить рост эоловой миграции вещества в 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 наблюдался низкий и экстремально низкий (1979 г.) приток в озеро со среднегодовым значением $45,5 \text{ км}^3$, на фоне которого Б.П. Агафоновым [2] зафиксирован рост эоловой миграции вещества.

Маловодный период 1996–2015 гг. включает в себя продолжительное и мягкое маловодье 1996–2013 гг. и короткое и жесткое — 2014–2015 гг. В 1996–2013 гг. среднегодовой приток в озеро составил $54,1 \text{ км}^3$, или 91 % от нормы. Отрицательная аномалия летних осадков фиксировалась главным образом в южных (бассейн Селенги) и центральных частях бассейна оз. Байкал, где значительно повышалась интенсивность эоловой миграции вещества (см. рис. 2). Зафиксированный в последние годы маловодный период на оз. Байкал отнюдь не уникален: в прошлом наблюдались не менее длительные и значительные по амплитуде понижения уровня (маловодья).

Многоводные периоды сопровождаются повышенной или экстремальной водностью на Селенге и других реках бассейна оз. Байкал, отрицательными аномалиями атмосферного 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 — $102,8 \text{ км}^3$ [33]. В эти периоды полевыми наблюдениями зафиксированы крупные оползни, высокая активность абразии берегов озера Байкал и сход мощных селей [3, 13], что нами отражено на рис. 3.

Таким образом, маловодные периоды наряду с многоводными являются частью многолетних циклических природных колебаний — вековых и внутривековых циклов водности, отличающихся продолжительностью и величиной отклонений от средних многолетних значений. Эти циклы контролируют ход экзогенных процессов, определяют особенности функционирования геоморфологических систем, выражающиеся в чередовании не только скорости, объемов, но и механизма перемещения вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов мониторинга показал, что создан единый банк данных по экзогенному рельефообразованию в Байкальской котловине. Эти данные востребованы исследователями как для развития теории геоморфологии, так и для решения актуальных практических задач.

Созданная база данных позволяет установить закономерности развития процессов и подойти к их прогнозированию. Главная закономерность — волновой характер их хода, зависящий от цикличности климатических показателей, главных факторов их проявления. В ближайшее время следует ожидать резкого усиления экзогенных процессов, что связано с активной циклонической деятельностью на юге Восточной Сибири [33], способствующей сходу селей, оползней, абразии берегов.

Природные предпосылки экстремального проявления процессов многократно могут быть усилены нерациональной хозяйственной деятельностью человека. В связи с этим Байкальскую котловину следует отнести к числу регионов с низким показателем геоморфологической безопасности территории, что требует тщательного планирования хозяйственной деятельности и проведения серьезных природоохранных мероприятий. Также следует учитывать возможную трансформацию экзогенных процессов, обусловленную тектоническими движениями в Байкальской рифтовой зоне.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (AAAA–A21–121012190017–5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Флоренсов Н.А.** Очерки структурной геоморфологии. — М.: Наука, 1978. — 238 с.
2. **Агафонов Б.П.** Экзолитодинамика Байкальской рифтовой зоны. — Новосибирск: Наука, 1990. — 176 с.
3. **Иметхенов А.Б.** Катастрофические явления в береговой зоне Байкала. — Улан-Удэ: Изд-во Бурят. пед. ин-та, 1994. — 65 с.

4. **Пиотровский М.В.** К познанию законов Земли. (Жизнь и исследования Уильяма Мориса Дэвиса и Вальтера Пенка). — М.: Мысль, 1984. — 157 с.
5. **Шнитников А.В.** Природные явления и их ритмическая изменчивость // Чтения памяти Л.С. Берга. — Л.: Гидрометеиздат, 1968. — С. 3–16.
6. **Полунин Г.В., Агафонов Б.П.** Волновые процессы в экзогенном рельефообразовании // Генезис рельефа. — Новосибирск: Наука, 1998. — С. 80–90.
7. **Резников А.П.** Проблема учета закономерностей при долгосрочном прогнозировании природных процессов (методологический и информационный аспекты) // Закономерности и прогнозирование природных явлений. — М.: Наука, 1980. — С. 7–25.
8. **Ильичёва Е.А.** Динамика структуры речной сети Селенги и ее дельты // География и природ. ресурсы. — 2008. — № 4. — С. 57–63.
9. **Ильичёва Е.А., Павлов М.В., Рогачёв А.П.** Комплексная оценка эрозионно-аккумулятивной деятельности русловой сети дельты Селенги // Природа Внутренней Азии. — 2019. — № 2 (11). — С. 95–107. — DOI: 10.18101/2542-0623-2019-2-95-107
10. **Dong T.Ya., Nittrouer J.A., Carlson B., McElroy B., Il'icheva E., Pavlov M., Ma H.** Impacts of tectonic subsidence on basin depth and delta lobe building // Journ. of Geophysical Research: Earth Surface. — 2023. — Vol. 128, Is. 2. — DOI: 10.1029/2022JF006819
11. **Tyumentseva E.M.** Risk assessment of dangerous Aeolian processes within the Baikal rift zone // IOP Conference Series Earth Environmental Science. — 2019. — Vol. 324 (1). — DOI:10.1088/1755-1315/324/1/012031
12. **Козырева Е.А., Кадетова А.В., Рыбченко А.А., Пеллинен В.А., Светлаков А.А., Тарасова Ю.С.** Типизация и современное состояние берегов озера Байкал // Водные ресурсы. — 2020. — Т. 47, № 4. — С. 453–465.
13. **Плюснин А.М., Перязева Е.Г.** Воздействие подъема уровня Байкала на инженерные сооружения прибрежных поселений // География и природ. ресурсы. — 2022. — Т. 43, № 5. — С. 74–82.
14. **Аюджанаев А.А., Гармаев Е.Ж., Цыдыпов Б.З., Содномов Б.В., Черных В.Н., Алымбаева Ж.Б., Жарникова М.А., Супруненко А.Г., Андреев С.Г., Гуржапов Б.О., Батоцыренов Э.А., Сат С.А., Тулохонов А.К., Салихов Т.К.** Моделирование изменения береговой линии и оценка влияния колебаний уровня озера Байкал на населенные пункты восточного побережья // География и природ. ресурсы. — 2022. — Т. 43, № 5. — С. 54–63.
15. **Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2022 году»** / Институт географии СО РАН, 2023. — Иркутск: Принт Лайн. — 372 с.
16. **Макаров С.А., Черкашина А.А.** Взвешенные наносы при прохождении паводков и селей на реках Байкальской горной территории // Рациональное использование и охрана водных ресурсов: Материалы Всеросс. науч.-практ. конференции с междунар. участием (Барнаул, 14–16 сент. 2017 г.). — Барнаул: Изд-во Алтайск. ун-та, 2017. — С. 118–123.
17. **Ресурсы поверхностных вод.** Ангара-Енисейский район. Бассейн оз. Байкал. — Л.: Гидрометеиздат, 1973. — Т. 16, вып. 3. — 368 с.
18. **Баженова О.И.** Эколого-геоморфологические последствия консервации сельскохозяйственных земель в бассейне оз. Байкал // География и природ. ресурсы. — 2009. — № 3. — С. 55–61.
19. **Баженова О.И., Кобылкин Д.В.** Динамика процессов деградации почв в бассейне Селенги в земледельческий период // География и природ. ресурсы. — 2013. — № 3. — С. 33–40.
20. **Лабутина И.А., Тарасов М.К.** Изучение распространения твердого стока реки Селенги по космическим снимкам // География и природ. ресурсы. — 2018. — № 1. — С. 66–72.
21. **Солоненко В.П.** Селевая деятельность в плейстоценовых областях катастрофических землетрясений // Бюлл. московского общества испытателей природы. Отд. геол. — 1963. — Т. 38, вып. 2. — С. 133–140.
22. **Макаров С.А.** Сели Прибайкалья. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2012. — 111 с.
23. **Чипизубов А.В.** О характере изменения сейсмичности как основы ее прогноза // Закономерности и прогнозирование природных явлений. — М.: Наука, 1980. — С. 87–95.
24. **Bazhenova O., Bardash A., Makarov S., Opekunova M., Tukhta S., Tyumentseva E.** The functioning of erosion-channel systems of the river basins of the South of Eastern Siberia // Geosciences. — 2020. — Vol. 10, Is. 5. — DOI: 10.3390/geosciences10050176
25. **Иметхенов А.Б.** О катастрофических последствиях понижений уровня озера Байкал // Актуальные вопросы техногенной безопасности: Материалы VIII Всеросс. науч.-практ. конференции. — Улан-Удэ: Изд-во Вост.-Сиб. ун-та технологий и управления, 2015. — С. 63–68.
26. **Вика С., Овчинников Г.И., Снытко В.А., Шипек Т.** Эоловые фации восточного побережья Байкала — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2002. — 56 с.
27. **Лут Л.А.** Результирующий ветровой поток над югом Восточной Сибири как основа для прогностических построений распространения взвесей // Закономерности и прогнозирование природных явлений. — М.: Наука, 1980. — С. 228–232.
28. **Тюменцева Е.М.** Ландшафтообразующая роль ветра на западном побережье озера Байкал // География и природ. ресурсы. — 2009. — № 3. — С. 61–67.
29. **Тайсаев Т.Т.** Эоловые процессы в Приольхонье и на о. Ольхон (Западное Прибайкалье) // Докл. АН СССР. — 1982. — Т. 265, № 4. — С. 948–951.

30. **Потемкин В.Л., Ходжер Т.В.** Корреляционный анализ и пространственная изменчивость поступления веществ из атмосферы в районе озера Байкал // Региональный мониторинг состояния озера Байкал. — М.: Гидрометеоздат, 1987. — С. 63–71.
31. **Bazhenova O., Tyumentseva E.** Contemporary aeolian morphogenesis in semiarid landscapes of the intermountain depressions of southern Siberia // Catena. — 2015. — N 134. — P. 50–58.
32. **Вологина Е.Г., Потемкин В.Л.** Характеристика эолового переноса в зимний период в районе Академического хребта озера Байкал // Геология и геофизика. — 2001. — Т. 42, № 1–2. — С. 254–257.
33. **Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В., Осипчук Е.Н.** Риски маловодных и многоводных периодов для озера Байкал // География и природ. ресурсы. — 2016. — № 5. — С. 29–38.

Поступила в редакцию 07.11.2024

После доработки 10.01.2025

Принята к публикации 10.03.2025