

Климатогенный криоморфогенез Юго-Восточного Алтая

Л. Б. ФИЛАНДЫШЕВА¹, П. С. БОРОДАВКО^{1, 2}, О. ДЕМБЕРЕЛ³

¹Томский государственный научно-исследовательский университет
634050, Томск, просп. Ленина, 36

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, Томск, Академический просп., 10

³Ховдский государственный университет
84153, Монголия, Жаргалант сум, Ховд 16/4300
E-mail: bor@ggf.tsu.ru

Статья поступила 19.12.2021

После доработки 28.12.2021

Принята к печати 30.12.2021

АННОТАЦИЯ

Для выявления причин активизации процессов криогенного оползания на территории Юго-Восточного Алтая выполнен детальный анализ временных изменений гидротермического режима естественных сезонов с 1936 по 2016 г. Анализ климатических условий лет пиковой оползневой активности, установленной при обработке данных космической съемки сверхвысокого разрешения, и сопоставление их с показателями, рассчитанными за период до начала устойчивого глобального изменения климата (1936–1970 гг.), свидетельствуют о выраженном потеплении климата и его активном влиянии на высокогорные криогенные системы. Периоды интенсификации оползнеобразования, вызванные экстремальным протаиванием деятельного слоя криолитозоны в 1998, 2012, 2016 гг., надежно коррелируются с аномалиями показателей гидротермического режима естественных сезонов года и их структурных единиц.

Ключевые слова: Юго-Восточный Алтай, криолитозона, криогенный оползень, сезонные ритмы климата.

Климат Земли на протяжении XX в. испытывал значительные изменения, которые четко проявлялись в повышении основной характеристики климата – глобальной температуры. С начала прошлого столетия средняя температура воздуха возросла на 0,74 °С, примерно две трети приходится на период после 1980 г. [Washington, 2011; State..., 2021]. Каждое из последних трех десятилетий было теплее предыдущего, температура воздуха была выше, чем в любое предшествующее

десятилетие, начиная с 1850 г. [Жоколин, 2014]. Потепление, наиболее ярко выраженное к началу XXI в., повсеместно сопровождалось климатическими аномалиями, в результате чего региональные климаты претерпели существенные изменения [Мартазинова, Тимофеев, 2008]. Устойчивое потепление атмосферы привело к значительному сокращению горного оледенения, активизировало темпы деградации альпийской мерзлоты и выразилось в интенсификации деструктивных

гравитационных процессов [Nelson et al., 2002; Schoeneich et al., 2011; Damm, Felderer, 2013; Shan et al., 2015, 2016; Достовалова, Оленченко, 2017], демонстрируя реакцию важнейших характеристик криолитозоны на потепление климата, определяемую всей совокупностью свойств меняющегося вслед за изменениями климата ландшафта и его компонентов [Конищев, 2009; Шполянская, 2010]. Несмотря на большое количество теоретических и прикладных работ, посвященных изучению влияния климатических изменений на криолитозону Земли, проблема изменения климатических режимов сезонов года в их естественных (а не формальных) границах и их воздействия на состояние, прежде всего верхних горизонтов грунта, который включает в себя слой годовых колебаний температуры и слой сезонного оттаивания и промерзания, не находит должного отражения в литературных источниках данного направления. Хотя является очевидной зависимость физических характеристик деятельного слоя мерзлых пород от погодных условий сезонов года, которые существенно изменяются как в пространстве, так и во времени [Filandysheva, Okisheva, 1995; Окишева, Филандышева, 2015].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для исследования закономерностей временных изменений гидротермического режима Юго-Восточного Алтая данные по температуре приземного слоя воздуха и осадкам со среднесуточным и среднегодовым разрешением по станции Кош-Агач за период с 1936 по 2016 г. (база данных ВНИИГМИ-МЦД) были сгруппированы в четыре периода: 1) с 1936 по 2016 г., 2) с 1936 по 1970 г., 3) с 1971 по 2006 г., 4) с 2001 по 2016 г. За границу между вторым и третьим временными периодами не случайно взят 1971 г.: в ряде публикаций [Груза, Ранькова, 2009; Шерстюков, 2008] указывается, что с начала 1970-х годов глобальные изменения климата стали наиболее выраженными. Рубежное значение 1936 и 2006 гг. объясняется необходимостью сопоставления результатов данного исследования с более ранними работами [Филандышева, Окишева, 2002; Шерстюков, 2008; Филандышева, Сорока, 2013]. Анализ последнего

периода, с 2001 по 2016 г., связан с появлением публикаций о смене с 2000-х годов положительной температурной тенденции на отрицательную. Закономерности временных изменений гидротермического режима анализировались методами математической статистики: проводилась оценка нормы и изменчивости статистических рядов, применялись корреляционный метод и тренд-анализ. Значимость линейных трендов устанавливалась по величине коэффициента детерминации. Тенденция считалась значимой, если уровень достоверности был равен или превышал 95 %.

Геоинформационный анализ динамики криогенного рельефогенеза выполнен в программной среде Microdem/TerraBaseII V16.0. с использованием полихронного набора пространственных данных сверхвысокого разрешения (фрагменты летних сцен мультиспектральных изображений с космических аппаратов Ikonos 2 и WorldView 2–4) за период с 2002 по 2016 г.

Район исследований расположен на северо-западе Чуйской межгорной котловины (рис. 1) и приурочен к приустьевому правобережью р. Чаган-Узун. Чуйская котловина ограничена со всех сторон хребтами: Южно-Чуйским и Сайлюгемом – на юге, Северо-Чуйским – на западе, Курайским – на севере и хребтом Чихачева – на востоке. Ее протяженность с запада на восток около 70 км и с севера на юг до 40 км. Абсолютные высоты выровненной и слегка наклоненной к р. Чуя донной части котловины варьируют в пределах 1750–2000 м. Климат территории резко-континентальный, засушливый (около 120 мм осадков в год), максимально близкий к монгольскому типу. Высотное положение котловины и суровые климатические условия обусловили развитие многолетнемерзлых пород, полупустынных и тундростепных ландшафтов.

На территории исследования многолетнемерзлые породы распространены достаточно широко [Розенберг, 1989; Шац, 1978]. Практически сплошное распространение криолитозона имеет в его юго-восточной части (рис. 2). В направлении на запад и северо-запад сплошное развитие криолитозоны сменяется прерывистым, островным развитием и, далее, зоной сезонного промерзания горных пород, расположенной вдоль северных

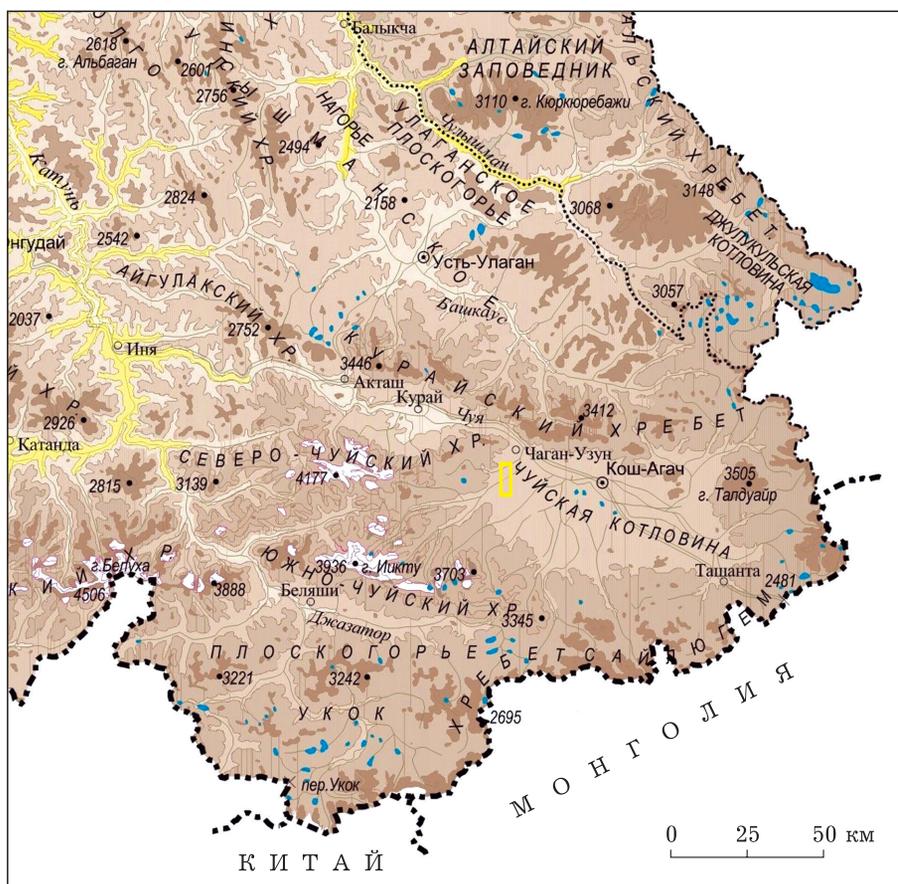


Рис. 1. Фрагмент физико-географической карты Республики Алтай ФГУП ВСЕ-ГЕИ, ФГУП Горно-Алтайская ПСЭ. Желтым прямоугольником указан район проведения исследований

и западных окраин Алтая. Чуйская межгорная впадина, расположенная на высоте 1750–2000 м, практически полностью перекрыта многолетнемерзлыми породами. Сплошность многолетнемерзлых пород нарушается таликами в ее северо-восточной части, в нижнем течении р. Тархаты и фрагментарно в долине Чуи.

Архивные материалы описания скважин, пробуренных в период 1969–1972 гг. сотрудниками Западно-Сибирской геолого-разведочной экспедиции, позволяют судить о мощности криолитозоны. Так, в поясе островного распространения многолетнемерзлых пород их мощность 6–90 м, прерывистого распространения – 50–160 м, сплошного распространения – 80–600 м. Однако предположительно в высокогорье она может достигать и 1000 м. Нижняя граница мерзлой толщи расположена, как правило, на глубине 45–60 м, в основном совпадая с подошвой алев-

ритовой тархатинской свиты, перекрывающей туерькскую свиту, сложенную карбонатными глинами. Но в ряде случаев она опускается значительно ниже. Скважина 215 в пос. Кош-Агач вскрыла многолетнемерзлые породы до глубины 75 м – ниже мерзлых пород нет. В скважине 55/72 (урочище Сары-Кобы, абс. отм. 2150 м) до глубины 90 м проходка велась в мерзлых валунно-галечных отложениях. В одной из скважин, вскрывшей границу тархатинской и туерькской свит на глубине 43,8 м и пройденной до глубины 251 м, многолетнемерзлые породы фиксировались до глубины 75 м, ниже залежали немерзлые породы, а затем вновь встречены многолетнемерзлые породы. Кровля многолетнемерзлых пород в Чуйской впадине залегает на глубине от 0,4 до 7 м, иногда до 16 м: низкое положение кровли мерзлой толщи всегда связано с особенностями геологического или гидрогеологического строения.

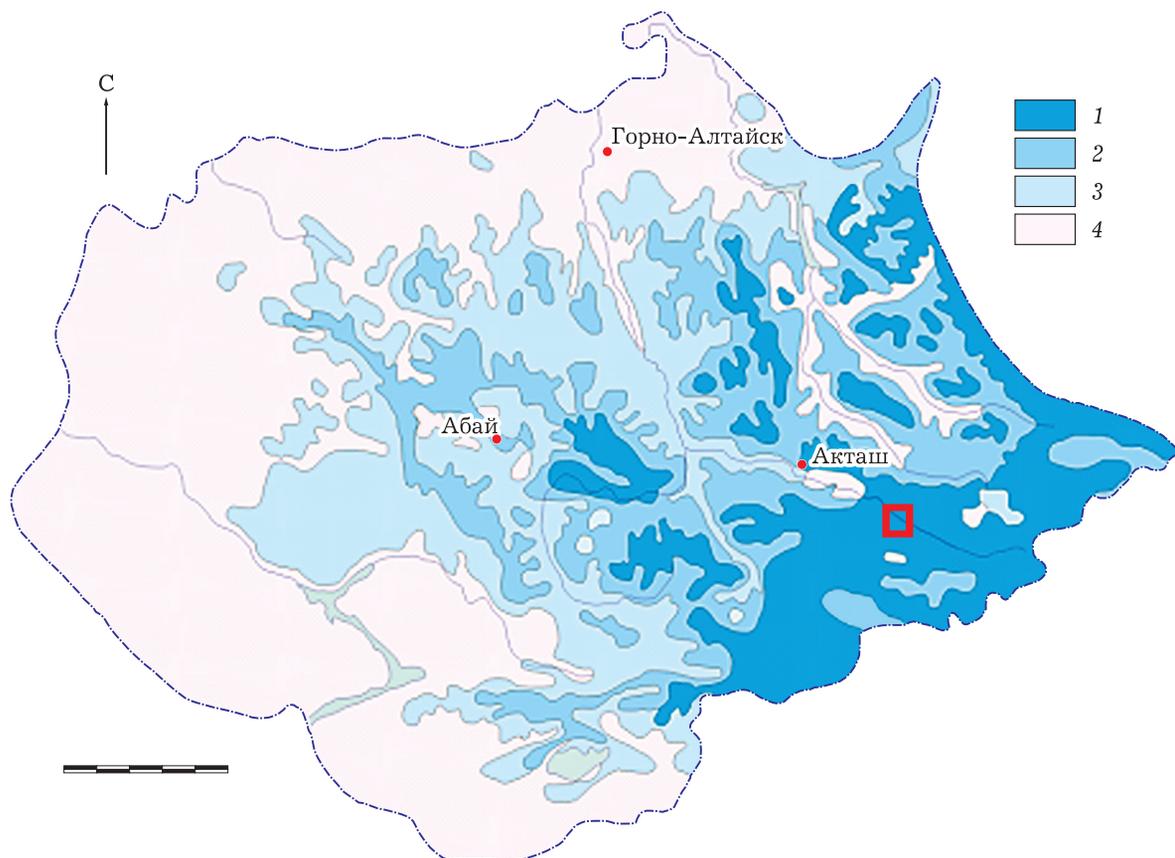


Рис. 2. Карта геокриологического районирования Горного Алтая (по: [Розенберг, 1989] с изменениями): 1 – пояс сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП); 2 – пояс прерывистого распространения ММП; 3 – пояс островного развития ММП; 4 – зона сезонного промерзания горных пород. Красным прямоугольником обозначен район исследований

РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным полевых геотермических наблюдений 2016 г. минимальная глубина весенне-летнего протаивания установлена в торфосодержащих породах полигона – 0,8 м. Максимальная мощность сезонно-талого слоя (до 5 м) отмечена нами в грубообломочных валунно-галечниковых озерно-пролювиальных и флювиогляциальных отложениях. В делювиально-пролювиальных отложениях (щебень с суглинистым заполнителем) мощность сезонно-талого слоя варьировалась в пределах 1,0–1,7 м, в мореных валунных суглинках – 1,5–2,5 м, в глинах – около 1 м.

В период наблюдений 2015–2016 гг. активное приповерхностное промерзание деятельного слоя началось в октябре и достигло максимальных глубин ко второй декаде февраля (рис. 3). Устойчивое протаивание сезонно-мерзлого горизонта отмечено в апреле.

К середине лета верхний слой мощностью около 20 см прогрелся до 15 °С, но лишь в августе такая температура проникла на глубину 80–85 см. Максимальный прогрев пород до глубины 3 м зафиксирован в конце сентября: породы на этой глубине прогрелись до 0,5 °С. По сравнению с предыдущим годом глубина протаивания увеличилась на 20 см, что вызвало формирование криогенных оползней в приустьевой правобережной части долины р. Чаган-Узун. Крутизна склонов, подверженных криогенному оползанию изменялась в пределах 10–20°. Оползни образованы в результате аномального протаивания деятельного слоя и формирования зеркала скольжения в виде серии линз жидкого грунта на границе протаивания сильнольдистых пород. Срывы значительных пластов грунта объемом до десятков тысяч кубических метров проявились в рельефе в виде мощных боковых валов выдавливания, смятия и опро-

кидывания высотой до нескольких метров (рис. 4).

Анализ результатов полевого мониторинга и данных дистанционного зондирования показал, что пики оползневой активности приходились на 1998, 2002, 2012, 2016 гг. (рис. 5). Для поиска причин, вызвавших активизацию оползневых процессов на фоне регионального потепления климата [Сухова, Журавлева, 2018], нами проанализированы особенности гидротермического режима указанных лет. На основе средних суточных значений приземной температуры воздуха (среднесуточной, минимальной и максимальной) и осадков для этих лет были рассчитаны среднеемесячные, среднесезонные, среднегодовые показатели (табл. 1). Полученные данные сопоставлялись с соответствующими параметрами, осредненными за отрезок времени до начала выраженного глобального потепления (с 1936 по 1970 г.) [Галахов, 1959; Павлов, Ананьева, 2004; Груза, Ранькова, 2009; Окишева, Филандышева, 2015], принятого нами за базу сравнения. Наличие климатических характеристик за каждый год 80-летнего периода позволило установить рейтинг и степень аномальности температурных показателей и сумм осадков каждого рассматриваемого года на таком значительном временном отрезке.

Основные особенности климатических сезонов в годы с пиковой оползневой активностью в исследуемом регионе рассматриваются нами с позиции их естественного сезонного ритма. При этом мы руководствуемся следующими положениями. Под естественными климатиче-

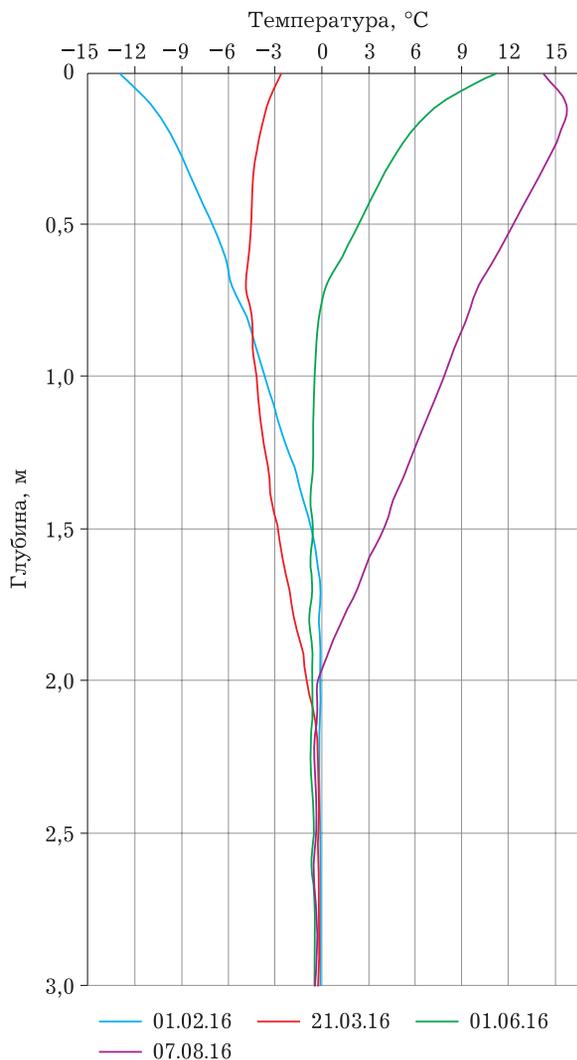


Рис. 3. Термический режим деятельного слоя по данным геотермической скважины ИМКЭС СО РАН “Тыдтуярык”

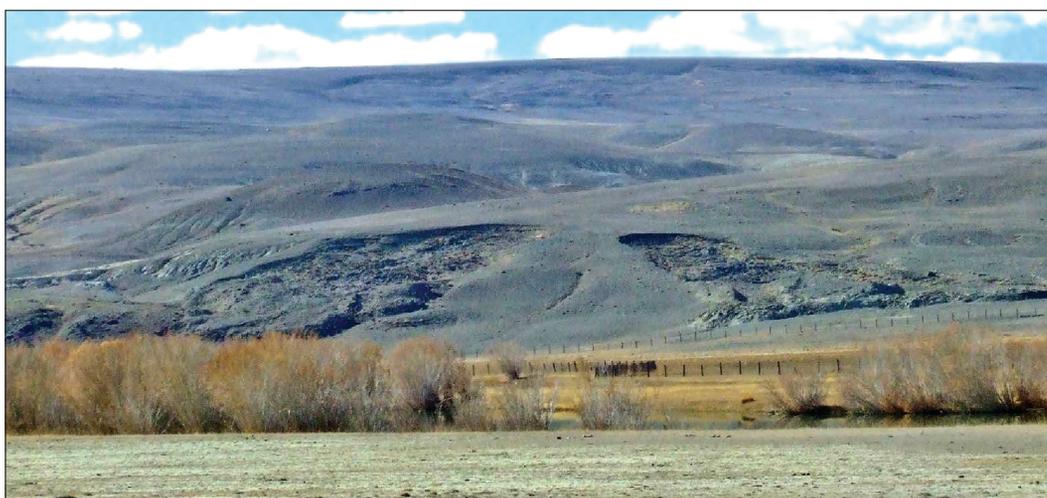


Рис. 4. Криогенные оползни в левобережье Чуи близ устья р. Чаган-Узун. Фото П. С. Бородавко, 2019 г.

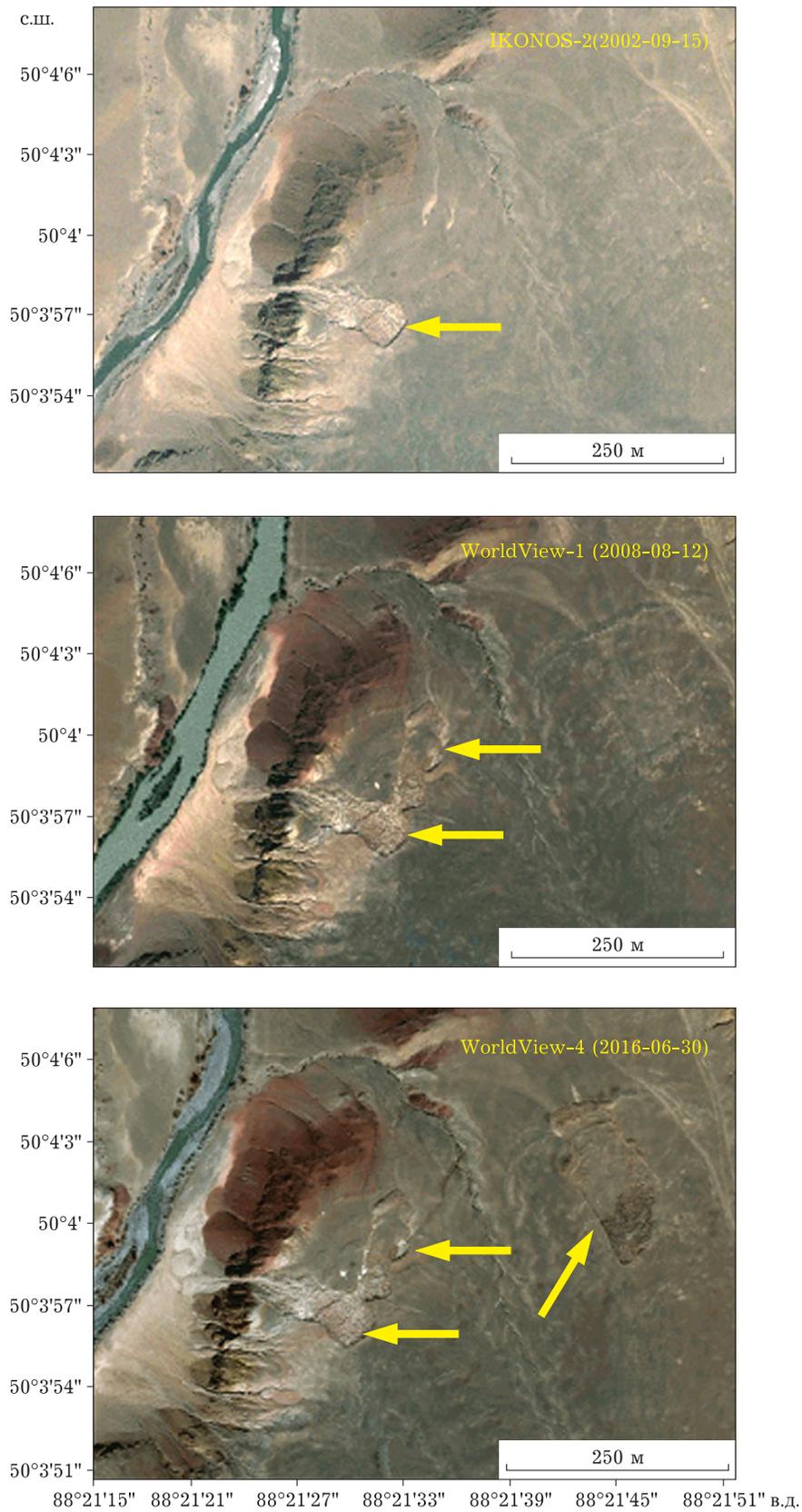


Рис. 5. На фрагментах полихронной космосъемки (2002, 2008, 2016 гг.) отображены стадии развития криогенных оползней (указаны стрелками) в приустьевой правобережной части долины р. Чаган-Узун

Среднемесячные температуры приземного слоя воздуха за 1998, 2002, 2012 и 2016 гг. на ст. Кош-Агач

Год	Месяц												Средняя за год
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
Среднемесячные среднесуточные температуры, °С													
1998	-27,2	-14	-8	-0,2	7,3	13,8	15,5	15,5	7,3	-0,6	-11	-23	-1,9
2002	-24,4	-20	-8	-1,5	8,1	7,1	15,8	14,9	7,3	-2,2	-12	-23	-2,4
2012	-30,3	-26	-12	2,6	7,4	16,6	16,3	12,4	7,9	-1	-13	-25	-3,6
2016	-32,8	-26	-13,6	2,4	5,4	14,2	17	13	9,6	-6,4	-15,9	-21,4	-4,7
1936–1970 (средняя)	-31,5	-27,9	-15,8	-1,7	6,2	12,2	14,2	12	5,5	-4,1	-17,4	-27,2	-5,1
Среднемесячные минимальные температуры, °С													
1998	-32,2	-21	-14	-6,5	0,1	7,3	9,6	7,8	0,1	-6	-16	-28	-8,1
2002	-29,5	-26	-15	-6,9	1,4	7,1	9	7,7	-1	-8,7	-18	-28	-8,8
2012	-34,5	-32	-19	-3,7	0,35	9,2	10,8	7,1	0,7	-11	-17	-29	-9,4
2016	-37,6	-32,3	-19,8	-2,8	-1,3	8,3	10,9	5,7	2,2	-9,5	-23,1	-27,1	-10,5
1936–1970 (средняя)	-34,2	-31,5	-20,7	-7,5	-0,2	5,7	7,9	5,5	-1,0	-9,4	-21,6	-30,2	-11,2
Среднемесячные максимальные температуры, °С													
1998	-19,7	-5	-0,2	7,3	14,6	21,3	22,3	23,5	14,6	5,5	-5	-16	5,2
2002	-18,5	-11	-0,3	4,9	15	20,8	22,9	22,5	16	5,3	-4	-16	4,8
2012	-23,2	-17	-3,3	9,3	15,4	23,9	22,7	18,9	15,3	4,6	-8	-20	3,3
2016	-25,5	-17,7	-6,4	8,5	12,2	21,2	23,5	20,6	17,6	0,4	-10,9	-15,2	2,4
1936–1970 (средняя)	-21,8	-16,5	-4,8	6,9	14,0	19,9	21,6	19,8	13,8	4,2	-9,2	-18,5	2,4
Среднемесячные амплитуды температуры, °С													
1998	12,5	15,8	13,8	13,8	14,5	14	12,7	15,7	14,5	12	10	11,5	13,4
2002	11,1	15	14	11,8	13,5	13,7	13,9	14,8	16,1	14	13	11	13,5
2012	11,4	15	16	13	15,7	15	11,9	11,8	14,6	16	9,4	9,6	13,3
2016	12,1	14,6	12,8	11,3	13,5	12,9	12,6	9,7	15,4	9,9	12,2	11,9	8,3
1936–1970 (средняя)	13,8	16,5	18,3	14,7	14,7	14,9	14,2	14,5	15,1	13,8	12,6	12	14,6

скими сезонами понимаются обособленные этапы годового цикла климатического компонента географической среды, характеризующиеся однотипностью, единой общей направленностью климатообразующих факторов и явлений и внешне выражающиеся в определенных взаимосвязанных становлениях других компонентов среды, изменениях аспектов ландшафтов [Галахов, 1959]. Под сезонной структурой

годового цикла имеется в виду количество сезонов, из которых состоит год, а под структурой сезона – количество фаз (структурных единиц), входящих в него [Рутковская, 1979].

К структурам первого порядка, согласно Н. В. Рутковской [1979], относятся холодно-снежная часть годового цикла (ХСЧГЦ) (или, согласно В. С. Ревякину, для горно-ледниковых бассейнов Алтая – гляциальный период

[Ревякин, Плотникова, 1978]) – это время со среднесуточными температурами приземного слоя воздуха устойчиво ниже 0 °С и вегетационная часть годового цикла (ВЧГЦ) – время со среднесуточными температурами устойчиво выше 0 °С.

Структурами второго порядка являются сезоны и их критерии. Для зимнего сезона – это даты начала устойчивых морозов и образования устойчивого снежного покрова в его начале и даты прекращения устойчивых морозов и достижения максимальных запасов воды в снежном покрове в конце. Летний сезон ограничивается в начале и конце датами устойчивого перехода среднесуточных температур воздуха через +10 °С на ветви подъема (начало) и спада (конец) температур соответ-

ственно. Переходные сезоны занимают временные отрезки между основными сезонами.

Внутри зимнего сезона нами также были рассмотрены периоды со среднесуточными температурами приземного слоя воздуха –20 °С и ниже (холодное ядро зимнего сезона) и со среднесуточными температурами –30 °С и ниже (период с экстремально низкими температурами).

В соответствии с указанными выше критериями границ структурных единиц годового цикла для анализируемых лет были рассчитаны показатели климатических режимов сезонов года и представлены в табл. 2 и 3. Они были также сопоставлены с соответствующими параметрами, рассчитанными за период с 1936 по 1970 г. В результате анализа выяс-

Т а б л и ц а 2

Климатические характеристики холодно-снежной части года, зимнего сезона и его структурных единиц за 1998, 2002, 2012 и 2016 гг. на ст. Кош-Агач

Период, годы	Климатические характеристики							
	T_n	T_k	Δl	t_{cp} , °С	t_{max} , °С	t_{min} , °С	A , °С	$\Sigma_{ос}$, мм
Холодно-снежная часть годового цикла								
1997/1998	22 окт.	24 апр.	185	-14,1	-4,4	-20,2	16,2	2,6
2001/2002	11 окт.	22 апр.	194	-15,4	-8,4	-21	12,6	15,2
2011/2012	10 окт.	31 мар.	174	-19,3	-11,7	-24,8	13,1	7,4
2015/2016	14 окт.	16 апр.	185	-18,5	-11,7	-23,9	13,1	37,7
1936-1970	05 окт.	17 апр.	196	-19,6	-11,4	-25,83	14,6	25
Зимний сезон								
1997/1998	08 нояб.	19 фев.	104	-20,9	-13,5	-26,4	12,9	0,9
2001/2002	19 нояб.	9 марта	111	-22,8	-15,8	-28	12,8	2,6
2011/2012	10 нояб.	18 марта	130	-23,7	-16,3	-29	12,7	1,9
2015/2016	2 нояб.	17 марта	137	-23,7	-16,5	-29,7	13,2	28,3
1936-1970	25 окт.	27 марта	155	-23,8	-15,48	-30,2	14,5	21,6
Холодное ядро зимнего сезона								
1997/1998	14 нояб.	06 фев.	85	-22,8	-14,1	-28,2	14,1	0,4
2001/2002	24 нояб.	15 фев.	84	-25,4	-19,1	-30,1	11	1,9
2011/2012	05 дек.	05 марта	92	-27,2	-19,6	-32,2	12,6	0,6
2015/2016	18 дек.	14 марта	118	-25,7	-18,4	-31,1	12,7	28,3
1936-1970	21 нояб.	09 марта	110	-27,8	-17,5	-33,6	16,3	15,3
Экстремально-холодное ядро зимнего сезона								
1997/1998	14 янв.	23 янв.	10	-32	-24,5	-37,7	13,2	0
2001/2002	1 дек.	20 дек.	20	-30,9	-25,4	-35,4	10	0
2011/2012	19 янв.	10 фев.	23	-32,5	-24,3	-37,5	13,2	0
2015/2016	4 янв.	5 фев.	33	-33,9	-26,3	-38,7	12,4	08
1936-1970	23 дек.	30 янв.	39	-31,4	-23,7	-36,9	13,2	5,1

П р и м е ч а н и е. T_n – дата начала; T_k – дата конца; Δl – продолжительность; t_{cp} – средняя суточная температура воздуха; t_{max} – средняя максимальная температура воздуха; t_{min} – средняя минимальная температура воздуха; A – средняя амплитуда колебания температуры; $\Sigma_{ос}$ – сумма осадков.

Климатические характеристики вегетационной части годового цикла, летнего и переходных сезонов года за 1998, 2002, 2012, 2016 гг. на ст. Кош-Агач

Период, годы	Климатические характеристики							
	T_n	T_k	Δl	$t_{ср}, ^\circ\text{C}$	$t_{макс}, ^\circ\text{C}$	$t_{мин}, ^\circ\text{C}$	$A, ^\circ\text{C}$	$\Sigma_{ос}, \text{мм}$
Вегетационная часть годового цикла								
1998	25 апр.	10 окт.	169	11,2	18,5	4,2	14,3	126
2002	23 апр.	14 окт.	175	10,9	18,2	3,8	14,4	88
2012	1 апр.	11 окт.	194	10,1	17,1	3,2	13,9	187,6
2016	17 апр.	4 окт.	171	11,1	18,4	4,5	13,9	120,8
1936–1970	18 апр.	04 окт.	170	9,1	16,5	1,9	14,6	89,5
Весенний сезон								
1998	20 фев.	23 мая	93	-2	5,4	-8,7	14,1	3,8
2002	10 март.	20 мая	72	-1	5,7	-6,8	12,5	15
2012	19 март.	29 мая	71	2,8	10,3	-3,8	14,1	4,6
2016	18 март.	24 мая	68	-2,4	7,6	-4,4	12,0	1,8
1936–1970	28 март.	31 мая	65	-1,4	9,3	-5,3	14,6	11,5
Летний сезон								
1998	24 мая	6 сент.	106	14,7	22,1	7,8	14,3	124
2002	21 мая	26 авг.	98	15,1	22,3	8	7,3	77,7
2012	30 мая	5 сент.	99	14,9	21,6	8,6	13	177
2016	25 мая	21 сент.	120	13,9	21,3	7,1	14,2	115,9
1936–1970	1 июн.	25 авг.	83	13,1	20,1	5,6	14,5	67,5
Теплое ядро летнего сезона								
1998	4 июля	17 авг.	45	16,7	25,9	10,1	66,8	66,8
2002	12 июля	21 авг.	41	16,8	24,5	9,5	45,4	45,4
2012	1 июня	27 июля	57	16,5	23,4	9,4	90,0	90,0
2016	27 июня	8 авг.	43	16,9	23,5	10,6	47,9	47,9
Осенний сезон								
1998	7 сен.	13 нояб.	68	0,63	7,3	-5,2	12,5	0,61
2002	27 авг.	9 нояб.	75	1,69	9,7	-5,6	15,3	6,5
2012	6 сент.	5 нояб.	61	1,65	8,4	-4,2	12,6	2,2
2016	22 сен.	6 нояб.	46	-2,8	2,7	-7,6	10,3	5,7
1936–1970	26 авг.	24 окт.	60	2,3	9,5	-5,3	14,8	14,6

П р и м е ч а н и е. Усл. обозн. см. в табл. 2.

нилось, что наибольшие отклонения временных характеристик ХСЧГЦ от нормы отмечались в разные годы. Так, наиболее позднее ее начало наблюдалось в 1997/98 г. (22.10 против 5.10), а ранний конец – в 2012 г. (31.03 против 17.04). Самой короткой из четырех лет была ХСЧГЦ в 2011/12 г. (174 дня против 196 дней по норме). По термическому режиму намного теплее обычного она была в 1997/98 и 2001/02 гг. (на 5,5 и 4,2 °C соответственно). Самое большое количество осадков было накоплено за холодно-снежную часть года в 2015/16 г., а наименьшее – в 1997/98 и 2011/12 гг. (см. табл. 2).

Зимние сезоны во все эти годы начинались значительно позднее нормальных сроков (от 12 дней в 1997/18 г. до 23 дней в 2011/12 г.). Раньше всего зима закончилась в 1997/98 г. (19.02 против 25.03 по норме) и оказалась самой короткой (104 дня против 152 дней по норме) и самой теплой (-20,9 °C против -23,8 °C по норме).

Холодное ядро зимнего сезона во все годы было короче (за исключением 2015/16 г.) и теплее обычного. Экстремально-холодный период зимнего сезона из четырех лет был продолжительнее и холоднее только в 2015/16 г. (см. табл. 2), что позволяет сделать вывод о том,

что в эти годы промерзание приповерхностного слоя многолетнемерзлых пород было менее интенсивным по сравнению с зимами других лет.

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности дат начала (конец ХСЧГЦ) и конца вегетационной части (начало ХСЧГЦ) годового цикла рассматриваемых лет были показаны при характеристике холодно-снежной части. По продолжительности отличается вегетационный период 2012 г. (194 против нормы 170 дней). По уровню температур (особенно минимальных и максимальных) эти годы существенно превышали средние значения периода с 1936 по 1970 г. Во все указанные годы (за исключением 2002) за ВЧГЦ выпало много осадков, особенно в 2012 г., когда их количество превысило норму базового периода в 2,1 раза (см. табл. 3).

Климатические характеристики весеннего сезона наибольшие отличия по сравнению с параметрами базисного периода имеют в 1998 г., когда из-за аномально раннего его начала продолжительность сезона была на 23 дня длиннее нормы (19.02 при норме 26.03), и по этой же причине он оказался холоднее обычного ($-2,0$ °С против $-1,4$ °С). Самой теплой из четырех лет оказалась весна 2012 г. ($+2,8$ °С против $-1,4$ °С).

Летние сезоны всех четырех лет были по температурным условиям заметно продолжительнее и теплее, чем в период с 1936 по 1970 г. Самым длинным лето было в 2016 г. (120 дней, что на 37 дней длиннее обычного), самым теплым – в 2002 г. ($+15,1$ °С, что на 2 °С выше нормы). В эти годы значительно больше было дождливых дней, и сумма летних осадков существенно превысила их среднюю величину за сравниваемый период (см. табл. 3). При анализе влияния климатических условий летнего сезона на криоморфогенез особое значение имеет выраженность его центрального ядра – периода со среднесуточными температурами воздуха, устойчиво превышающими $+15$ °С. Следует отметить, что на кривой многолетнего хода среднесуточной температуры воздуха, осредненной за период с 1936 по 1970 г., такой отрезок не выделяется. В рассматриваемые годы его продолжительность была более месяца и изменялась

от 41 дня (2002 г.) до 57 дней (2012 г.). В 2012 г. средний уровень среднесуточных температур этой фазы был выше $+16$ °С, минимальных – около $+10$ °С (время теплых ночей) и максимальных – $+23$ °С и выше (время жарких дней) (см. табл. 3). Осенние сезоны анализируемых лет были несколько холоднее обычного. Из временных характеристик обращают внимание более поздние сроки ее начала в 2016 г. (22.09 против 26.08 по норме) и конца в 1998 и 2002 гг. (13.11 и 9.11 при норме 25.10). Самой теплой и продолжительной была осень 2002 г. (75 дней при средней температуре воздуха $+1,7$ °С).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ климатических условий лет с пиковой оползневой активностью и сопоставление их с показателями, рассчитанными за период до начала устойчивого глобального изменения климата (1936–1970 гг.), свидетельствуют о выраженном потеплении климата и его активном влиянии на криогенные системы Юго-Восточного Алтая. Периоды экстремумов протаивания деятельного слоя криолитозоны Юго-Восточного Алтая в 1998, 2012, 2016 гг. надежно коррелируются с аномалиями показателей гидротермического режима естественных сезонов года и их структурных единиц. Большая по сравнению с другими годами продолжительность летнего сезона и его теплового ядра в сочетании с аномально большим количеством выпавших осадков сыграли ведущую роль в активизации криогенных гравиационных процессов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта 20-55-44008 Монг_а “Эволюция оледенения, постгляциальный лимногенез и динамика статических водных ресурсов Большого Алтая с середины XIX века”. Исследования выполнены по госбюджетному проекту ИМКЭС СО РАН, номер FWRG-2021-0003.

ЛИТЕРАТУРА

- Галахов Н. Н. Изучение структуры климатических сезонов года. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 183 с.
- Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. 2009. № 11. С. 15–29.
- Достовалова М. С., Оленченко В. В. Строение и динамика развития сейсмогенного оползня в условиях крио-

- литозоны Горного Алтая // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI, № 1. С. 26–35
- Кокорин А. О. Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2014. 80 с.
- Коницев В. Н. Вечная мерзлота и потепление климата // География и геоэкология на современном этапе взаимодействия природы и общества. СПб., 2009. С. 684–688.
- Мартазинова В. Ф., Тимофеев В. Е. Современное состояние атмосферной циркуляции воздуха в Северном и Южном полушариях и региональные климатические особенности в Атлантико-Европейском секторе и районе Антарктического полуострова // Пробл. Арктики и Антарктики. 2008. № 3. С. 17–37.
- Окишева Л. Н., Филандышева Л. Б. Временная динамика и функционирование ландшафтов Западной Сибири. Томск: Изд. дом ТГУ, 2015. 316 с.
- Павлов А. В., Ананьева Г. В. Оценка современных изменений температуры воздуха на территории криолитозоны России // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII, № 2. С. 3–9
- Ревякин В. С., Плотникова Л. А. Структура гляциального периода горноледниковых бассейнов Алтая // Вопр. географии Сибири. 1978. Вып. 9. С. 48–63.
- Розенберг Л. И. Геокриологические условия Алтая // Геокриология СССР. Горные страны Юга СССР. М.: Недра, 1989. С. 226–246.
- Рутковская Н. В. Климатическая характеристика сезонов года Томской области. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1979. 116 с.
- Сухова М. Г., Журавлева О. В. Изменения температуры воздуха и осадков в межгорных котловинах Юго-Восточного и Центрального Алтая // Изв. РАН. Сер. геогр. 2018. № 6. С. 93–101. doi.org/10.1134/S258755661806016X
- Филандышева Л. Б., Окишева Л. Н. Сезонные ритмы природы Западно-Сибирской равнины. Томск: Пеленг, 2002. 404 с.
- Филандышева Л. Б., Сорока А. С. Изучение ритмов зимнего сезона на юго-западе Западно-Сибирской равнины в свете глобальных изменений климата // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. естеств. и техн. науки. 2013. Т. 18, вып. 2. С. 710–714.
- Шац М. М. Геокриологические условия Алтае-Саянской горной страны. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1978. 103 с.
- Шерстюков Б. Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2008. 247 с.
- Шполянская Н. А. Вечная мерзлота и глобальные изменения климата. М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотичная динамика, 2010. 199 с.
- Damm B., Felderer A. Impact of atmospheric warming on permafrost degradation and debris flow initiation – a case study from the eastern European Alps // E&G Quat. Sci. J. 2013. N 62 (2). P. 136–149. doi: 10.3285/eg.62.2.05
- Filandysheva L. B., Okisheva L. N. Seasonal climatic rhythms on the West Siberian Plain // Polar Geography. 1995. N 19 (4). P. 267–276. doi: 10.1080/10889379509377576
- Nelson F. E., Anisimov O. A., Shiklomanov N. I. Climate Change and Hazard Zonation in the Circum-Arctic Permafrost Regions // Natural Hazards. 2002. Vol. 26, N 3. P. 203–225.
- Schoeneich P., Dall'Amico M., Deline P., Zischg A. Hazards related to permafrost and to permafrost degradation // PermaNET project, state-of-the-art report 6.2. On-line publication ISBN 978-2-903095-59-8
- Shan W., Hu Z., Guo Y., Zhang C., Wang C., Jiang H., Liu Y., Xiao J. The impact of climate change on landslides in southeastern of high-latitude permafrost regions of China // Front. Earth Sci. 2015. doi: 10.3389/feart.2015.00007
- Shan W., Ying G., Zhaoguang H., Wang C., Chengcheng Z. Landslides Caused by Climate Change and Groundwater Movement in Permafrost Mountain // River Basin Management. 2016. Vol. 1. doi: 10.5772/63068
- State of the Global Climate 2020 // WMO – N 1264.2021.56P
- Washington D. C. America's Climate Choices. The National Academies Press, 2011. 15 p.

Climatogenic cryomorphogenesis of South-Eastern Altai

L. B. FILANDYSHEVA¹, P. S. BORODAVKO^{1, 2}, O. DEMBEREL³

¹*Tomsk State Research University
634050, Tomsk, Lenin av., 36*

²*Institute of Monitoring of Climate and Ecological Systems SB RAS
634055, Tomsk, Akademicheskiiy av., 10*

³*Hovd State University
Mongolia, Hovd 16/4300, Zhargalant sum 84153
E-mail: bor@ggf.tsu.ru*

To identify the causes of activation of cryogenic landslide processes in the territory of South-Eastern Altai, a detailed analysis of temporal changes in the hydrothermal regime of natural seasons from 1936 to 2016 was carried out. Analysis of climatic conditions of the years of peak landslide activity established during processing of ultra-high resolution satellite imagery data and their comparison with indicators calculated for the period before the beginning of steady global climate change (1936–1970) indicates pronounced climate warming and its active influence on high-mountain cryogenic systems. Periods of landslide intensification caused by extreme thawing of the active layer of cryolithozone in 1998, 2012 and 2016 are reliably correlated with anomalies of indicators of hydrothermal regime of natural seasons and their structural units.

Key words: South-Eastern Altai, cryolithozone, seasonal climate rhythms, cryogenic landslide.