

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»



Национальный
исследовательский
**Томский
государственный
университет**



**Геолого-
географический
факультет**

Томского
государственного
университета

ДИНАМИКА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕОСФЕР ЗЕМЛИ

Материалы Всероссийской конференции с международным участием,
посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете
специалистов в области наук о Земле

8–12 ноября 2021 года

ТОМ II

Томск 2021

УДК 551.5; 556
ББК Д26

Динамика и взаимодействие геосфер Земли. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. В 3-х томах. Том II. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2021. – 216 с.

ISBN 978-5-89702-481-0

Во втором томе сборника представлены материалы двух секций: «Динамика и взаимодействие гидро- и криосферы» и «Состояние атмосферы и климатические ресурсы».

Для специалистов в области гидрологии, гляциологии, метеорологии и климатологии.

Редакционная коллегия: Эрнст Р.Э., Орлов В.П., Добрецов Н.Л., Коротеев В.А., Ревердатто В.В., Пеков И.В., Соломина О.Н., Врублевский В.В., Дюкарев А.Г., Изох А.Э., Кирпотин С.Н., Переведенцев Ю.П., Подобина В.М., Семенов С.М., Хорошев А.В.

Ответственные редакторы II тома:

Д.А. Вершинин, А.А. Ерофеев, В.А. Земцов, О.В. Носырева

Технический редактор – Е.М. Асочакова

Заключение

Ранее авторами совместно с В.А. Домаренко и О.Е. Лепокуровой (Savichev, Lepokurova, Domarenko, 2020) было отмечено, что внутригодовые изменения состава вод реки Омутной характеризуются: 1) ростом взвешенной формы миграции веществ при увеличении общего содержания взвешенных частиц и твердого стока; 2) увеличением от весеннего половодья до зимней межени содержания веществ с преимущественно растворенной формой миграции (Ca, Mg, Na, K, Cl, S) и максимумами веществ с преобладанием взвешенной формы миграции (Fe, Y, La, Ce) весной. Для содержания Ti отмечено разное соотношение растворенной и взвешенной форм по длине (Savichev, Lepokurova, Domarenko, 2020). Но в рассматриваемом створе у с. Малиновки в целом выявлено существенное преобладание взвешенной формы, что совпадает с указанными выше общими тенденциями и определяет особенности используемой модели, в частности, использование в уравнении (3) содержания взвешенных веществ.

Содержание и состав взвешенных веществ влияет на площадь, время и характер взаимодействий в системе «вода – порода». В частности, в случае р. Омутной у с. Малиновки эти факторы способствуют аккумуляции титана на участках с наименьшей интенсивностью водообмена и усилению выноса с возрастанием водно-

го стока. С учетом этого можно предположить, что наибольшие концентрации этого элемента более вероятны при относительно устойчивом (в геологическом отношении) снижении интенсивности водообмена.

Литература

1. Недрa России. В 2 т. Т. 1. Полезные ископаемые / под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смыслова. СПб.; М.: Горный ин-т, Межрегион. центр по геол. картографии, 2001. 547 с.
2. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / под ред. Е.Н. Трибунского, М.С. Паровинчака. Кемерово: ООО «Сарс», 2001. 214 с.
3. Savichev O.G., Domarenko V.A., Lepokurova O.L. Spatiotemporal changes in river waters and bottom sediments composition within the Tugan placer deposit (Tomsk oblast) // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya, 2020, (5), pp. 715–727. DOI: 10.31857/S2587556620050143.
4. Савичев О.Г., Гусева Н.В. Методология управления геохимическим балансом водосборов на территории Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 5. 28–45. DOI 10.18799/24131830/2020/5/2634.

УДК 551.435.1; 551.435.5

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕРМОЭРОЗОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СЕВЕРЕ ЯКУТИИ

А.М. Тарбеева¹, В.С. Ефремов², Л.С. Лебедева², В.В. Шамова^{2,3},
А.А. Куть², Я.В. Тихонравова²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия amtarbeeva@yandex.ru

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

³Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Полевые работы выполнены при поддержке РФФИ: проекты №20-05-00840 (А.М. Тарбеева), № 18-05-70091 (А.А. Куть, Я.В. Тихонравова), РФФИ № 20-35-70027 (Л.С. Лебедева, В.С. Ефремов, В.В. Шамова). Методические исследования проведены в рамках ГЗ № 121051100166-4 МГУ и ГЗ № АААА-А20-120111690008-9 ИМЗ СО РАН.

В 2019 г. в устьевом районе р. Лены и в окрестностях пос. Тикси начаты наблюдения за динамикой 15 малых термоэрозийных форм. Ключевые участки исследования охватывают естественные и антропогенно измененные ландшафты с разнообразными геоморфологическими и мерзлотно-литологическими условиями, определяющими различные темпы динамики термоэрозийных форм. Предварительный анализ метеорологических условий за годы наблюдений показывает, что в образовании рытвин и динамике вершин оврагов в высокольдистых отложениях решающую роль играют не осадки, а температурные условия.

Ключевые слова: термоэрозия, овраги, рытвины, многолетняя мерзлота, климатические изменения, Арктика

Fieldwork was carried out with the support of the RFBR: projects No. 20-05-00840 (A.M. Tarbeeva), No. 18-05-70091 (A.A. Kut, Ya.V. Tikhonravova), RFBR No. 20-35-70027 (L. S. Lebedeva, V. S. Efremov, V. V. Shamov). Methodological studies were carried out within the framework of State Task No. 121051100166-4 Moscow State University and State Task No. ААААА 20-120111690008-9 IMZ SB RAS.

In 2019, observations of the dynamics of 15 thermoerosional forms were started in the Lena Delta region and Tiksi area. The key areas of research are natural and disturbed landscapes with different geomorphology, cryology and lithology, which determine different rates of dynamics of thermoerosional forms. A preliminary analysis of weather monitoring data over the years of our observations proves that temperature conditions, not atmospheric precipitation, play a decisive role in the formation of rills and the dynamics of the gully heads in ice-rich permafrost.

Keywords: thermal erosion, gullies, rills, permafrost, climate change, Arctic

Интенсивные климатические изменения в Арктике приводят к активизации многих экзогенных процессов, приводящих к изменению рельефа, состава и объема выносимых веществ, создающих угрозу инженерным сооружениям. Одним из таких процессов является термоэрозия – размыв мерзлых пород под действием механической и тепловой составляющих деятельности водного потока (Термоэрозия..., 1982). Еще несколько десятилетий назад термоэрозия была очень ограничено развита в естественных условиях тундры (Эрозионные процессы..., 1999), но приобретает всё большие масштабы в условиях современных климатических изменений (Bowden, Gooseff et al., 2008; Gooseff, Balser et al., 2009; Godin et al., 2014).

В 2019 г. были начаты исследования динамики малых термоэрозионных форм – оврагов и рытвин – в устьевом районе р. Лены, а в 2020 г. – в окрестностях пос. Тикси. Первые наблюдения были проведены при помощи повторных тахеометрических съемок и прямых измерений рулеткой. В 2020–2021 гг. стала применяться съемка с квадрокоптера DJI Mavic mini, которая в результате фотограмметрической обработки перекрывающихся снимков позволяет получить ортофотопланы и цифровые модели местности, что дает возможность более детально и менее трудозатратно оценить динамику термоэрозионных форм.

Всего к концу полевого сезона 2021 г. получены съемки 15 термоэрозионных форм, на шести из которых имеются повторные наблюдения (табл.). Кроме мониторинга динамики форм рельефа, проводились измерения расходов воды, взвешенных наносов, производился отбор проб воды на химические анализы, изучался состав, естественная влажность и строение размываемых отложений. Вблизи исследуемых объектов расположены государственные метеостанции им. Ю.А. Хабарова (о. Столб) и Тикси, а на о. Самойловском в дельте р. Лены с 2002 года работает автоматическая метеостанция российско-германской экспедиции и проводятся наблюдения за динамикой деятельного слоя по программе CALM (Voike et al., 2019). Такой набор наблюдений позволяет делать предварительные выводы о темпах, причинах и механизмах развития современных термоэрозионных процессов на Севере Якутии. Детальная обработка полученных данных и дальнейшие наблюдения позволят существенно уточнить полученные выводы, которые, возможно, послужат основой соответствующих прогнозов.

Исследуемые термоэрозионные формы расположены на трех ключевых участках (табл.), различающихся по геоморфологическим условиям. Ключевой участок «Хабарово» (рядом с метеостанцией им. Ю.А. Хабаро-

ва) расположен в материковой части суши в устьевом районе р. Лены на отрогах Хараулахского хребта. Рельеф представлен невысокими сопками (с отметками до 171 м н.у.м.), нижние части склонов которых сложены алевритистыми суглинками и вмещают полигонально-жильные льды. Ключевой участок вблизи пос. Тикси расположен на склоне г. Лялькина, также имеющем рыхлый склоновый чехол с мощными ледяными жилами. Ключевой участок «Курунгнах» расположен в дельте р. Лены на одноименном острове, сложенном позднеплейстоценовыми отложениями ледового комплекса и подстилающей песчаной пачкой (Григорьев, 1993). Участки «Хабарово» и «Курунгнах» находятся в пределах Усть-Ленского природного заповедника – территории, защищенной от хозяйственной деятельности в течение последних 35 лет. Овраг в пос. Тикси частично инициирован проложенным в 50 м выше него зимником.

Исследуемые термоэрозионные формы можно отнести к двум типам: овраги и рытвины (промоины) (Тимофеев, 1981). Рытвины – недавно возникшие небольшие (глубиной менее 1–1,5 м) термоэрозионные формы, которые быстро развиваются и могут быть быстро заполнены наносами, но могут и перерасти в овраг. Овраги – более крупные и устойчиво существующие формы, имеют глубину более 1–1,5 м, как правило, существуют более длительное время.

За время наблюдений произошло возникновение трех рытвин и одного оврага – это наиболее динамичные формы. Две из этих форм появились в 2020 и две – в 2021 году.

Наблюдаемые рытвины возникли в нижних частях склонов пологих сопкок вдоль склоновых ложбин стока, являющихся местами концентрации склоновых вод. Такая приуроченность рытвин отмечается и другими авторами (Bowden et al., 2008). Ведущую роль в возникновении рытвин играет тепловая составляющая водного потока. Рытвины возникают благодаря развитию подземных каналов, образующихся при вытаивании подземных льдов, в результате последующего обрушения кровли тоннелей. В бортах свежесформированных рытвин вскрывается лед. Характерной особенностью рытвин является образование конуса выноса свежих наносов в долинах принимающих ручьев. Несмотря на малые размеры, рытвины можно отнести к наиболее динамичным формам рельефа, так как они возникают в течение одного теплого сезона и быстро заполняются наносами, утрачивая свежий облик. Развитие рытвин на участке «Хабарово» ограничено близким (1–1,5 м) залеганием коренных алевролитов, замедляющих глубинную эрозию.

Таблица. Список наблюдаемых термоэрозионных форм и время проведения измерений

№	Название	Координаты, с.ш. в.д. WGS 1984	Август 2019	Сентябрь 2020	Июль 2021	Сентябрь 2021
Ключевой участок «Хабарово»						
1	Метеорологический овраг	72°23'40» 126°49'10»	+	+	+	
2	Левый Метеорологический овраг	72°23'46» 126°49'00»	+	+	+	
3	Нескучный	72°23'22» 126°49'52»	+	+		
4	Рытвина №1	72°23'32» 126°51'27»		+	+	+
5	Рытвина №2	72°23'49» 126°51'05»				+
6	Рытвина Арбузная	72°23'58» 126°49'04»				+
Ключевой участок «Курунгнах»						
7	Овраг №2 левый	72°20'02» 126°16'40»				+
8	Овраг №2 правый	72°19'54» 126°16'40»				+
9	Овраг №3	72°19'18» 126°15'44»			+	
10	Овраг №4	72°19'39» 126°16'15»			+	+
11	Активный Левый	72°22'27» 126°14'18»				+
12	Активный Правый	72°22'18» 126°14'24»				+
13	Рытвина Левая	72°19'43» 126°02'28»			+	
14	Рытвина Правая	72°19'44,9724» 126°02'03,5711»			+	
Ключевой участок «Тикси»						
15	Овраг в Тикси	71°37'54» 128°52'43»			+	+

Наблюдения на рытвине №1 (табл.) показали, что через год она заполнилась наносами. Рытвины Левая и Правая (табл.), приуроченные к склонам долины р. Даркет на о. Курунгнах, очень специфичны, так как возникли и существуют благодаря спуску пойменных вод р. Лены, ежегодно затапливающих эту долину.

Овраг вблизи пос. Тикси также возник как рытвина в теплый период 2020 г., однако наличие мощных полигонально-жильных льдов видимой мощностью 4,3 м, а также более глубокое залегание коренных пород (около 4,6 м), позволило рытвине быстро углубиться и развиться в овраг. Образованию рытвины предшествовало развитие термоэрозионных тоннелей и колодцев в ледяных жилах. К сентябрю 2021 года сформировавшийся овраг достиг длины 50,5 м и ширины 14 м. Глубина оврага на начальном этапе образования достигла

4,6 м, но к сентябрю 2021 г. уменьшилась до 3,8 м за счет аккумуляции в днище обрушенных бортов оврага.

Овраги ключевого участка «Хабарово» приурочены к истокам ручьев и малых рек. Отсутствие мощных ледяных включений и близкое залегание коренных пород приводит к тому, что динамика их невелика. Максимальные скорости отступания бровки наблюдались на овраге Метеорологическом в 2019-2020 гг. и достигали 1,6 м/год. Динамика других оврагов этого участка существенно ниже. Большой вклад в развитие оврагов, ориентированных на восток, вносит медленное стаивание здесь сезонных снежников, которые препятствуют размыву днища, но разжижают грунт, приводя к медленному сползанию материала бортов оврага.

Овраги №2, №3 и №4 о. Курунгнах образуются на подмываемом р. Леной уступе третьей террасы.

Постоянное увеличение уклонов, удаление наносов из устья за счет размыва уступа р. Леной и сезонные изменения базиса эрозии за счет динамики уровней воды этой реки способствуют активному развитию оврагов. В вершинах овраги растут аналогично рытвинам, образуя тоннели и промоины в мощных полигонально-жильных льдах. Значительную роль играет отступление склонов оврагов за счет образования термоцирков под действием инсоляции и теплового воздействия воздуха на оголенные борта, сложенные чистым льдом, а также оползания деятельного слоя. Повторные наблюдения, проведенные в июле и сентябре 2021 г., показали, что вершина Оврага №4 за два теплых месяца регрессивно отступила на 14 м, при этом за счет оползания склонов в средней части оврага его бортики на значительном протяжении отступили на 10 и более метров. Сравнение разновременных космических снимков показывает, что в разные годы периодически активизировались вершины разных оврагов. Причины этого пока не установлены.

Левый и Правый Активные овраги на о. Курунгнах расположены в истоках малой реки и не подвержены изменению колебаний уровня воды р. Лены, хотя их оголенные борта несут признаки динамики. Данные повторных съемок по ним пока отсутствуют.

Таким образом, наибольшие темпы динамики имеют овраги, формирующиеся в высокольдистых отложениях ледового комплекса на подмываемом уступе террасы в дельте р. Лены и в районе пос. Тикси. Линейный прирост этих оврагов достигает первых десятков метров в год, а потоки воды в этих оврагах летом имеют мутность около 500-700 мг/л. Также высокими темпами динамики обладают рытвины, формирующиеся за один теплый сезон вдоль склоновых ложбин стока в нижних частях склонов сопки. За 2 года наблюдений образовались 4 рытвины, одна из которых через год утратила свежий облик, а другая (у пос. Тикси) развилась в овраг.

Предварительный анализ метеорологических данных показывает, что возникновение рытвин в 2020 и 2021 г. не было связано с аномальным выпадением ат-

мосферных осадков, а приурочено к годам с высокими среднегодовыми температурами воздуха, что позволяет предположить, что в условиях высокой льдистости отложений основную роль в развитии термоэрозии может играть глубина сезонного протаивания и тепловая составляющая водного потока.

Литература

1. Григорьев М.Н. Криоморфогенез устьевой области долины р. Лены. Якутск: ИМЗ СО РАН. 1993. 176 с.
2. Термоэрозия дисперсных пород. / Е.Д. Ершов. М.: Изд-во МГУ. 1982. 194 с.
3. Тимофеев Д.А. Терминология флювиальной геоморфологии. М.: Наука. 1981. 268 с.
4. Эрозионные процессы Центрального Ямала / А.Ю. Сидорчук, А.В. Баранов. СПб: РНИИ культурного и природного наследия. 1999. 350 с.
5. Boike J., Nitzbon J., Anders K., et al. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River Delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote sensing data and land surface, snow, and permafrost models // *Earth System Science Data*. 2019. V. 11, pp. 261–299. <https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019>
6. Bowden W.B., Gooseff M.N., Balsler A., Green A., Peterson B. J., Bradford J. Sediment and nutrient delivery from thermokarst features in the foothills of the North Slope, Alaska: Potential impacts on headwater stream ecosystems // *Journal of Geophysical Research*. 2008. V. 113. G02026. doi:10.1029/2007JG000470.
7. Godin E., Fortier D., Coulombe S. Effects of thermo-erosion gullying on hydrologic flow networks, discharge and soil loss // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9. 105010 (10pp) <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105010>
8. Gooseff M. N., Balsler A., Bowden W. B., Jones J. B. Effects of hillslope thermokarst in northern Alaska // *Eos. AGU*. 2009. Vol. 90. N 4. pp. 29–30.