

МОРФОЛОГИЯ И ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МНОГОЛЕТНИХ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ (ГИДРОЛАККОЛИТОВ) НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН.

¹Демидов В.Э., ¹Демидов Н.Э., ¹Веркулич С.Р., ²Веттерих С.

¹ФГБУ «АНИИ», Санкт-Петербург, Россия; vasdemidov@mail.ru

²Институт Полярных исследований Альфреда Вегенера, Гельмгольц центра, Потсдам, Германия

Проведенный анализ аэрофотоснимков и цифровой модели рельефа выявил 136 многолетних бугров пучения (гидролакколитов) на архипелаге Шпицберген, распространенных на абсолютных высотах от 0 до 201 м над уровнем моря, с медианной высотой основания бугра 42 м над уровнем моря. Выше уровня голоценовой трансгрессии расположены 44 гидролакколита, и 92 расположены ниже. Определены морфологические показатели гидролакколитов, их положение в рельефе. Геоморфологических условий для образования гидролакколитов с закрытой системой на архипелаге не обнаружено. Выявлено наличие в долинах питающих разломов, по которым происходит подъем подмерзлотных подземных вод различного химического состава (гидролакколиты открытой системы). Сравнение аэрофотоснимков 1936-1938 гг. с аэрофотоснимками 2008-2012 гг. показывает, что в настоящее время большинство гидролакколитов неактивны, но отступление ледников и промерзание моренных полей провоцирует рост новых бугров пучения, причем рост этот происходит интенсивно (до 1 м в год) и прекращается в короткие сроки (первые годы - первые десятилетия). 21 гидролакколит продолжает проявлять активность в виде выходов источников подмерзлотных вод. Осушенные термокарстовые кратеры обнаружены на 19 гидролакколитах всех размеров и положения в рельефе. Активные заполненные водой кратеры обнаружены только на крупных гидролакколитах высотой более 12 м. Выявлены переходные формы рельефа, которые могут указывать на наличие подземных льдов, не выраженных на поверхности как классические точечные бугры пучения.

Ключевые слова: *гидролакколит, мерзлота, Шпицберген, термокарст, цифровая модель рельефа*

Для горных долин архипелага Шпицберген характерно наличие многолетних бугров пучения (гидролакколитов). Эти формы рельефа здесь исследованы различными методами, в том числе и бурением [Demidov et al., 2019, Demidov et al, 2021], однако, по географическому распределению существует лишь одно комплексное исследование [Liestøl, 1977].

В настоящей работе анализ морфологии и географического распределения гидролакколитов Шпицбергена проведен на основе цифровой модели рельефа S0 Terrengmodel Svalbard DEM model [2014] Норвежского полярного института (<https://toposvalbard.npolar.no>) с привлечением серий аэрофотоснимков 1936-1938 гг., 2008-2012 (Норвежский полярный институт), спутниковых снимков (Landsat), геологических карт масштаба 1:100 000 (Норвежский полярный институт, АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция») и собственных наблюдений за полевые сезоны 2017-2021 гг.

Спутниковые и аэрофотоснимки выявили по характерным морфологическим особенностям (пучение, дилатационные трещины, кратеры) в общей сложности 136 гидролакколитов на архипелаге, из которых 123 расположены на о. Западный Шпицберген, а 13 - на о. Эдж (Рис. 1). 44 гидролакколита стоят выше уровня голоценовой трансгрессии (самый высоко расположенный находится на высоте 201 м над уровнем моря) и 92 ниже (самые низкие в зоне волнового заплеска).

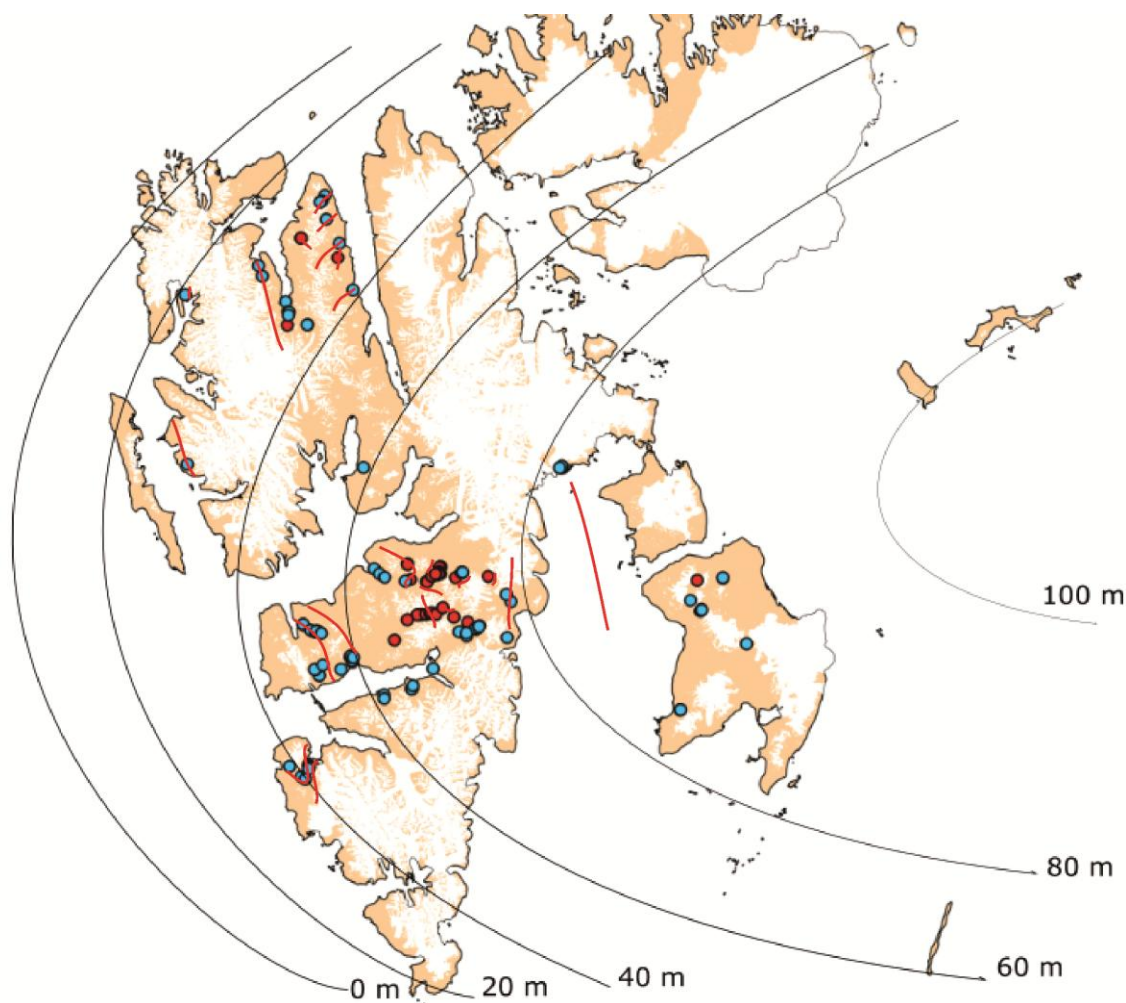


Рис. 1. Гидролакколиты арх. Шпицберген и их расположение относительно максимального уровня голоценовой трансгрессии. Красные точки - гидролакколиты, сформировавшиеся выше уровня трансгрессии, синие точки - гидролакколиты, сформировавшиеся ниже уровня трансгрессии. Максимальный уровень голоценовой трансгрессии (м абс) показан изолиниями по Bondevik et al. [1995]. Красными линиями отмечены основные разломы по геологическим картам масштаба 1:100 000 [Dallmann et al., 1993, *Geoscience Atlas of Svalbard*, 2019; Милославский и др., 2020].

Высоты бугров от основания до вершины достигают 40 м (медианная высота 7 м); диаметр колеблется от 20 до 900 м (медианный диаметр 150 м); медианная абсолютная высота расположения гидролакколитов (высота основания бугра) на Шпицбергене составляет 42 м над уровнем моря (Рис. 2). Интервал между 30 и 60 м над уровнем моря в долинах Шпицбергена является наиболее благоприятным для образования гидролакколитов (здесь образовался 51 гидролакколит). Нижние части долин, имеют немного меньшее количество гидролакколитов (41), причем для этих бугров часто характерны оголенные вершины с отсутствием растительности, что может указывать на их относительно более молодой возраст.



Рис. 2. Распределение гидролакколитов арх. Шпицберген по абсолютным высотам.

Географическое распространение гидролакколитов Шпицбергена показывает, что они встречаются исключительно в речных долинах горных районов, где высота гор и ледников над основанием гидролакколита превышает 270 метров. Самые большие гидролакколиты расположены в районах с наибольшей для архипелага высотой горных хребтов, что подтверждает ранее высказанное мнение о том, что многолетние бугры пучения Шпицбергена относятся к открытому типу [Liestøl, 1977].

49 гидролакколитов имеют форму полусферы; 40 не имеют классической сферической формы, представляя собой хаотические бугры со множеством вершин, кратеров и лопастей; 23 имеют форму вытянутого овала; 19 имеют малые размеры, не позволяющие точно описать форму; и 5 гидролакколитов эродированы настолько, что потеряли первоначальные очертания.

47 гидролакколитов стоят на дистальных частях пролювиальных и аллювиальных конусов (что является наиболее распространенным геоморфологическим положением); 35 - на речных террасах; 27 - на руслах рек и поймах; 20 - на нижних частях горных склонов; 5 - на моренах малого ледникового периода; и 2 на дельтах рек. Ни одного гидролакколита не было обнаружено в осушенных озерах или изолированных котловинах (что типично для гидростатических бугров пучения). 8 гидролакколитов сформировались на склонах/у подножия склонов с северной экспозицией, а 32 - с южной экспозицией. Большинство гидролакколитов стоят относительно близко к современным ледникам (медианное расстояние - 3 км).

88 гидролакколитов располагаются в пределах Центрального третичного бассейна Шпицбергена, 17 - тектонического блока Земли Андре и 18 - мезозойской платформы восточного Шпицбергена и о. Эдж. В этих тектонических провинциях преобладающими типами горных пород являются осадочные сланцы, алевриты и песчаники. 13 гидролакколитов встречены в Западно-шпицбергенской зоне разломов, где присутствуют филлиты, слюдяные сланцы, мрамор и другие метаморфические породы. Единственные районы, где гидролакколиты не образовались - это области распространения каменноугольных и пермских известняков, доломитов и гипсов.

55 гидролакколитов располагаются над линиями подтвержденных разломов. Гидравлическое давление настолько высоко, что рост гидролакколитов часто затрагивает коренные скальные грунты. Согласно анализу аэрофотоснимков, литературным данным и полевым наблюдениям, 61 бугор пучения долин может быть заложен по скальным грунтам.

Сравнительный визуальный анализ аэрофотоснимков 1936-1938 гг. с аэрофотоснимками 2008-2012 гг. показывает, что абсолютное большинство гидролакколитов не изменили своей морфологии и не проявляли активности за этот период (Рис. 3). Только пять гидролакколитов можно надежно датировать как сформировавшиеся после 1936-1938 годов. Это гидролакколит Riverbed в долине Адвент и 4 гидролакколита, выросшие на освобождающихся ото льда моренах малого ледникового периода (ледники Элизебрин и Гардебрин). Имеющиеся наблюдения за этими гидролакколитами дают основание предположить, что рост гидролакколитов Шпицбергена при активации происходит в высоких темпах (увеличение

высоты бугра до 1 м ежегодно) и останавливается (или, по крайней мере, замедляется до минимума) в течение относительно короткого времени (несколько лет - первые десятки лет).

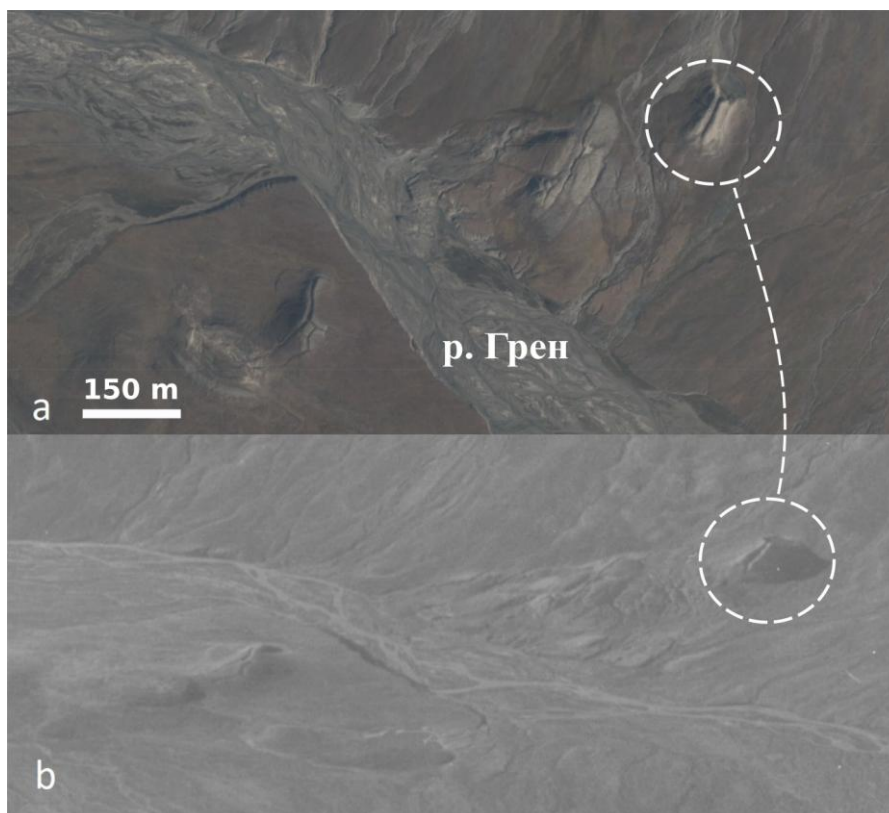


Рис. 3. Пример стабильной морфологии гидролакколитов арх. Шпицберген: группа гидролакколитов в д. Грендален на аэрофотоснимках (а) 2010 г., (б) 1938 г. (Norwegian Polar Institute Topo Svalbard resource). Для ориентации один пример выделен штрихованной линией.

Активность в форме выхода на поверхность источников подмерзлотных вод продолжает проявлять 21 гидролакколит. Образование термокарстовых кратеров происходит на гидролакколитах на всех абсолютных высотах без какой-либо конкретной корреляции с размером бугра. Присутствуют как сухие, так и заполненные водой кратеры, причем кратеры, заполненные водой (11 гидролакколитов), встречаются только внутри крупных гидролакколитов с высотой бугра более 12 м.

Анализ аэрофотоснимков Земли Андре выявил морфологические переходные формы (формы со сложной атрибуцией) между классическими гидролакколитами и каменными ледниками (rock glaciers/talus terraces). Еще одни формы рельефа, похожие на гидролакколиты, представляют собой платформы с плоской вершиной. Анализ аэрофотоснимков в сочетании с полевыми данными из долины Холлендердален [Демидов и Демидов, 2019] и материалами предшественников [Втюрин, 1989] показывает, что эти платформы, вероятно, содержат горизонтальные слои массивного льда внутри. Эти горизонтальные слои льда могут представлять собой гидравлические интрузии, которые морфологически не выражаются как классические сферические насыпи.

ЛИТЕРАТУРА

Втюрин Б.И. Подземные льды Шпицбергена // Материалы гляциологических исследований. Хроника, обсуждения. 1989. № 65. С. 69-75.

Демидов В., Демидов Н. Криогенные процессы, явления и связанные с ними опасности в районе российского рудника Баренцбург на архипелаге Шпицберген // ГеоРиск. 2019. Т. XIII. №4. С. 48-62. doi:10.25296/1997-8669-2019-13-4-48-62

Милославский М.Ю., Сироткин А.Н., Шарин В.В., Окунев А.С., Костева Н.Н., Краснова Н.Г. Комплект карт геологического содержания центральной части Земли Норденшельда масштаба 1:100 000 // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: Тез. докл. XV Всерос. науч. конф. (г. Мурманск, 28–30 октября 2020 г.). 2020. С. 68–70.

Bondevik S., Mangerud J., Salvigsen O. Postglacial sea-level history of Edgeøya and Barentsøya, eastern Svalbard // *Polar Research*. 1995. Vol. 14. Is. 2. P. 153-180. doi: 10.3402/polar.v14i2.6661

Geoscience Atlas of Svalbard. 2nd edition. Technical editor Dallman W.K. Norsk Polarintstitutt, Pp. 71, 85, Tromso, 2019: 71-85.

Dallmann W.K., Andresen A., Bergh S.G., Maher H., Ohta Y. Tertiary fold-and-thrust belt of Spitsbergen, Svalbard. NorskPolarinstitutt Meddelelser N. 128, Oslo, 1993. 46 p.

Demidov N., Wetterich S., Verkulich S., Ekaykin A., Meyer H., Anisimov M., Schirrmeister L., Demidov V., Hodson A.J. Geochemical signatures of pingo ice and its origin in Grøndalen, West Spitsbergen. // *The Cryosphere*, 2019. Vol. 13. P. 3155-3169. doi: 10.5194/tc-13-3155-2019

Demidov V., Verkulich S., Demidov N., Schirrmeister L., Wetterich S., Koshurnikov A., Gagarin V., Ekaykin A., Terekchov A., Veres A., Kozachek A. Pingo drilling reveals sodium chloride dominated massive ice in Grøndalen, Spitsbergen // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2021, Vol. 32. Is. 4. P. 572-586. doi:10.1002/ppp.2124

Liestøl O. Pingos, springs, and permafrost in Spitsbergen // Norsk Polarinstitutt Årbok 1975, 1977. P. 7-29.

Terrengmodell Svalbard (SO Terrengmodell). Norwegian Polar Institute, 2014. doi:10.21334/npolar.2014.dce53a47

MORPHOLOGY AND SPATIAL DISTRIBUTION OF PINGOS ON SVALBARD

¹Demidov V.E., ¹Demidov N.E., ¹Verkulich S.R., ²Wetterich S.

¹Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia; vasdemidov@mail.ru

²Alfred Wegener Institute Helmholtz Center for Polar and Marine Research, Permafrost Research, Potsdam, Germany

The analysis of aerial and satellite images and digital elevation model revealed 136 pingo mounds on Svalbard archipelago, distributed at absolute heights from 0 to 201 m above sea level (asl) with median absolute height 42 m asl. There are 44 pingos standing above maximum level of the Holocene transgression (often causing bedrock deformation) and 92 standing below (predominately quaternary deposits deformation). The morphological parameters of pingos and their geomorphological position were determined. In all cases the surrounding terrain appeared unfavorable for the formation of open system pingos and instead for at least 61 pingo feeding geological faults were allocated based on published geological data. Comparison of aerial photographs of 1936-1938 with aerial photographs of 2008-2012 showed that the morphology of Svalbard's pingos during this period did not change, with the exception of four pingos that grew on LIA moraines following local glacier's retreat, and one other "Riverbed" pingo that appeared in Adventdalen after 1936. The growth of these pingos when initiated is dynamic (mounds gaining height up to 1 m annually) but stops in a short time (several years/decades). Twenty one pingo continue to show activity in the form of perennial subpermafrost springs outflow. Dried thermokarst craters were found on 19 pingos of all sizes and geomorphological position and 11 active water-filled craters were found only on large pingos with mounds over 12 m high. Transitional landforms were designated that may point to underground ice intrusions that don't reveal themselves as classical pingo mounds.

Keywords: *pingo, massive ice, permafrost, Svalbard, spatial distribution, thermokarst*