

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. — Возможность использования величины отношения углерода к азоту как критерий разделения палъза и литальза // Арктика и Антарктика. – 2023. – № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.3.44176 EDN: VKRSQW URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=44176

Возможность использования величины отношения углерода к азоту как критерий разделения палъза и литальза

Васильчук Алла Константиновна

доктор географических наук

ведущий научный сотрудник, Московский государственный университет им. МВ. Ломоносова (МГУ)

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, ГСП-1, 1, географический факультет, НИЛ геоэкологии Севера

✉ alla-vasilch@yandex.ru



Васильчук Юрий Кириллович

ORCID: 0000-0001-5847-5568

доктор геолого-минералогических наук

профессор, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, Московский государственный университет имени МВ. Ломоносова; географический факультет

119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские Горы, 1, оф. 2009

✉ vasilch_geo@mail.ru



[Статья из рубрики "Многолетнемерзлые породы и подземные льды Арктики, Антарктики и горных регионов"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2023.3.44176

EDN:

VKRSQW

Дата направления статьи в редакцию:

29-09-2023

Аннотация: Бугры пучения – палъза и литальза – являются надежным индикатором наличия многолетнемерзлых пород особенно на южной границе их распространения. Предметом исследования является рассмотрение отношения содержания углерода (C) к азоту (N) в торфе палъза и подстилочном и гумусовом горизонтах литальза как критерия

разделения пальза и литальза. Рассмотрены пальза близ пос. Елецкая (67°16' с.ш., 63°69' в.д.) в Большеземельской тундре и литальза на полигоне, расположенном в Южном Забайкалье на территории Ивано-Арахлейского заказника близ с. Преображенка (52° с.ш., 113° в.д.) и в долине р. Сенца (52°40' с.ш., 99°30' в.д.) в Восточном Саяне. Рассмотрена история изучения литальза и пальза в России начала XX века: показано, что российские исследователи выделяли минерагенные бугры пучения наряду с торфяными. Установлено, что содержание азота в поверхностных слоях литальза (0,45-1,73% в долине р.Сенца и 0,47-2,01% у оз.Арахлей) находится примерно в том же диапазоне, что и в поверхностных горизонтах пальза независимо от региона криолитозоны. Обобщены результаты определения содержания углерода и азота, а также их отношения в торфяном покрове пальза. В отличие от литальза содержание углерода в поверхностных горизонтах пальза и плоскобугристых торфяников многократно превышает полученные значения как для поверхностных, так и для погребенных органических горизонтов почвенного покрова литальза. Для торфяного покрова пальза не зафиксировано значение C/N меньше 13, этот показатель для литальза никогда не превышает 10-12

Ключевые слова:

многолетнемерзлые попорды, торфяно-минеральные бугры пучения, минеральные бугры пучения, голоцен, торф, углерод, азот, Большеземельская тундра, Саяны, Забайкалье

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда (грант № 23-17-00082).

Введение

Пальза -торфяники в масштабах биосферы содержат существенный запас углерода (C), поэтому их динамика в биосфере, имеет важные для последствия для глобального углеродного цикла Динамика бугристых торфяников, а также показатели содержания азота и углерода в Арктике и Субарктике вызывают у исследователей повышенный интерес в связи с оценкой эмиссии парниковых газов и изменением продуктивности тундровых ландшафтов, а также с тем, что бугры пучения – пальза и литальза - являются надежным индикатором наличия многолетнемерзлых пород особенно на южной границе их распространения. Однако неопределенности оценок динамики углерода в различных временных масштабах, разные подходы требуют дальнейшего изучения этих сложных природных систем.

Согласно определению, приведенному в Wikipedia: пальза – это торфяные бугры (холмы) с многолетнемерзлым торфяно-минеральным ядром, литальза — это образовавшиеся под действием мороза бугры (холмы) в районах распространения многолетнемерзлых пород с богатыми минералами почвами, где в почве образовалась линза многолетнего льда. Определения из международного геокриологического словаря-справочника^[1]: пальза - торфянистые бугры (холмы) многолетней мерзлоты, ядро которых состоит из чередующихся слоев сегрегационного льда, торфа или минерального почвенного материала. В пояснении термина минерагенные пальза (minerogenic palsa) говорится, что С.Харрис^[2] описал последовательность стадий развития пальзаобразных холмов, развитых в минеральных почвах в районе Фокс-Лейк (Юкон), для которых он предложил название «литальза». Он предположил, что необходимо новое название, поскольку процессы переноса тепла и влаги в минеральных почвах отличаются от процессов в

торфяных грунтах.

Отечественные геокриологи литальза ранее не выделяли, а в тех случаях, когда минеральные бугры встречались их называли бугристыми марями, буграми-могильниками и т.д. [\[3,4,5\]](#). Близкими по строению к литальза являются бугры-табелеры, широко распространенные в межгорных котловинах Алтая.

Надо признать и то, что термин литальза не сразу привился и в англоязычной литературе. Долгое время использовали другие термины: "минерогенные пальза" [\[6\]](#), "минеральные пальза" [\[7\]](#), "пальзоподобный бугор" [\[2\]](#), "криогенные бугры" [\[8\]](#) и "минеральный многолетнемерзлый бугор" [\[9\]](#). И только после работы А. Писсара [\[10\]](#) ледо-минеральные бугры предпочитают называть литальза (lithalsa).

Первыми использовали термин литальза по отношению к, изученным в долине р. Акколь на Алтае, российским ледо-минеральным буграм Г. Ивахана с коллегами [\[11\]](#).

Ю.К. Васильчук впервые встретил сравнительно невысокие минеральные бугры (литальза высотой до 1 м располагавшиеся непосредственно между железнодорожных путей) в парагенезе с пальза вблизи пос. Хановой, близ г.Воркута в 2002 г., однако не придал этому должного внимания и зафиксировал это только в публикации 2016 г.: "Бугры пучения - как торфяные, так и минеральные - мерзлые..." [\[12\]](#). Причиной более внимательного отношения к минеральным буграм пучения стало детальное исследование ледогрунтовых залежей в толще минерального многолетнемерзлого бугра (литальза) в долине р. Сенца в Западной Бурятии [\[13,14\]](#). Вскрытые ледогрунтовые залежи, представляли собой ядра бугров пучения инъекционно-сегрегационного типа – литальза – и сформировалась в позднем голоцене.

Распознавание бугров пучения и их типа: пальза, литальза или пинго-булгунняхи не является простой задачей, так как морфология и морфометрия их достаточно близка. И в том и в другом случае это бугры выпуклой формы высотой от 0,5 до 5-8 м (редко 10 м и более - у пинго) округлого или овального (эллиптического) очертания в плане (диаметром обычно первые десятки метров. Важным критерием разделения является наличие торфяного покрова, нередко мощного (до 5 и более метров) у пальза (рис. 1), и его нередко почти полного отсутствия в разрезах литальза (рис. 2) и пинго.



Рис. 1. Пальза, перекрытый мощным слоем торфа, у пос. Елецкий. Фото Ю.К. Васильчука



Рис. 2. Литальза в долине р. Сенца. Фото Дж.Ю. Васильчук

Объекты настоящего исследования - литальза в Южном Забайкалье и Восточном Саяне, а также пальза в Большеземельской тундре. Основная задача исследования оценка сходства и различий в распределении азота и углерода в этих криосферных объектах.

Климатическая характеристика районов исследования

Пальза у пос. Елецкий. Изученный массив [\[15-17\]](#) типичных пальза (см. рис. 1, рис. 3) расположен в Европейской части Полярного Урала (67°02' с.ш. и 64°12' в.д.) у пос. Елецкий в 52 км к югу от Воркуты. Климат субарктический, характеризуется как неустойчивый с сильными снегопадами, метелями и морозами. Период отрицательных температур – с октября по март. По данным метеостанции Елецкая в интервале 1959–2022 гг., минимальная среднегодовая температура отмечена в 1998 г. –8.3°C; среднее значение этого показателя –4.9°C, максимальное –0.8°C в 2020 г.

Наиболее низкая среднесуточная температура наблюдалась в феврале 1966 г. –30°C, и феврале 1998 г. –29.6°C; среднесуточная январская температура составила –19.7°C, средняя температура трех зимних месяцев –18.2°C. Максимальная среднесуточная температура +18.3°C зафиксирована в июле 2007 г., средняя июльская температура +13.7°C, за период наблюдений не зафиксировано среднесуточной июльской температуры ниже +7.6°C, которая наблюдалась в 1997г., средняя температура трех летних месяцев составила +10.5°C.



Рис. 3. Пальза у пос. Елецкий. Фото Ю.К. Васильчука

Литальза в долине р. Сенца. Изученный массив литальза на левом берегу р. Сенца (52°39.827' N, 99°29.858' E), расположен в пределах спущенного озерного бассейна на юго-востоке Восточного Саяна на Окинском плато. Климат в пределах Окинського плоскогорья резко континентальный. По данным ближайшей метеостанции Орлик (52°50' с.ш. 99°82' в.д. высота над уровнем моря - 1375 м - <http://www.pogodaiklimat.ru/history/29998.htm>): среднегодовая температура за период 1934-2022 гг. находится в пределах от -2.7°C до -6.6°C, среднеянварская температура -24.5°C (от -33.2 до 17.1 °C), абсолютный минимум -46.9°C, средняя температура самого теплого месяца июля 13.4°C (от +11.1 до +16.3°C), абсолютный максимум +35.8°C. Среднегодовая температура мерзлых пород изменяется в пределах -2.1...-8.5°C, иногда повышаясь до -0.5, -1°C. Сезонно протаивающий слой на междуречных пространствах имеет мощность 1,0-1,5 м, достигая 3,5 м на южных склонах. На поверхности первой террасы р. Сенца (абсолютная высота 1387 м) изучены и разбурены крупные литальза высотой от 4 до 7-9 м. Температура грунтов одного из самых крупных литальза (высотой 7 м) по данным термометрии глубокой скважины составляет -2.1 °C (на глубине 10 м), и -1.0 °C (на глубине 20.4 м).

Литальза у пос. Преображенка в Забайкальском крае распространены в прибрежной зоне оз.Арахлей (52°13'с.ш., 113°48' в.д.) в Беклемишевской котловине (тектонической впадине забайкальского типа). Климат характеризуется как резко-континентальный. Для района характерны большие суточные и сезонные колебания температур, высокий уровень солнечной радиации (годовая сумма радиационного баланса равна 30.6 ккал/см²). По данным ближайшей метеостанции Бургень): среднегодовая температура за период 1937-2022 гг. находится в пределах от -1.5°C до -6.2°C, среднее значение - 3.5°C, среднеянварская температура -27.2°C (от -34.8 до -22.3 °C), абсолютный минимум -52°C. средняя температура самого теплого месяца июля +17.1°C (от +13.5 до +20.3°C). абсолютный максимум достигает +34°C. Продолжительность безморозного периода составляет 70-90 дней, при очень позднем переходе устойчивых температур через +10°C. Продолжительность вегетационного периода около 130 дней. За год в этом районе выпадает 350-380 мм осадков. Из них на вегетационный период приходится от 280 до 320 мм (наиболее обильны осадки в июле и августе). В зимний период количество осадков колеблется от 1 до 5 мм, поэтому высота снежного покрова не превышает 10-15 см, на лесистых хребтах и увалах- 150 см. Многолетнемерзлые породы отмечаются на северных склонах, наибольшая мощность ММП отмечена в падах.

Методы измерений содержания органического углерода (C) и азота (N)

Для определения содержания органического углерода (C,) и азота (N), из разрезов пальза и литальза отбирались образцы торфа и почвенных горизонтов объемом около 1-0,5 см³. Пробы подвергались сублимационной сушке в течение двух дней, затем измельчались в агатовой ступке и вновь высушивались при 60°C в течение 2 часов. Образцы помещались в капсулы из фольги, взвешивались с точностью до 5 знака. Измерения процентного содержания азота и углерода были выполнены в лаборатории геохимии ландшафтов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. Измерения проводились на CHNS-анализаторе VARIO EL III V4.01 20.Aug. 2002, Elementar Analysen systeme GmbH Германия. В качестве стандарта была использована сульфаниловая кислота (Merck) со значениями N = 8,090%, C = 41,610%.

Результаты

Литальза у пос. Преображенка. Литальза были изучены О.Е. Максимовой^[18] на территории Ивано-Арахлейского заказника в 300 м южнее с.Преображенка в Забайкальском крае (52°13'с.ш., 113°48' в.д.). О.Е. Максимова при содействии Д.М.Шестернева детально описала два литальза: один высотой 2,5 м (рис. 4), другой высотой 1.2 м.



Рис. 4. Литальза близ пос. Преображенка. Фото О.Е.Максимовой

Для температурных наблюдений Д.М.Шестернёвым с коллегами была пробурена скважина на вершине наиболее крупного 2,5-метрового пальза. В его разрезе сверху вниз вскрываются: 0 – 2 см – дернина; 2 – 25 см – серо-бурая пылеватая слабо оторфованная супесь с большим количеством корней; 25 – 41 см – серо-бурая пылеватая слабо оторфованная супесь с небольшим количеством корней; 41 – 63 см – плотный бурый пылеватый суглинок с включением корней; 63 – 93 см – очень плотный бурый суглинок; 93 – 100 см – очень плотный серо-бежевый суглинок. Весь грунт очень сухой, с поверхности бугор перекрыт пылеватой слабо оторфованной супесью, подстилаемый суглинком. В маленьком бугре было заложено два шурфа, грунт в разрезе бугра влажный и сильно оторфованный. В разрезе с поверхности также залегает супесь, ниже переходящая в суглинок. В скважине на вершине наиболее крупного бугра пучения отрицательные температуры грунта прослеживаются до глубины 4,5 м на склоне бугра (рис. 6) и до глубины 7,8 м на его вершине.

В крупном бугре было заложено три шурфа: в верхней, средней и нижней части (рис. 5).

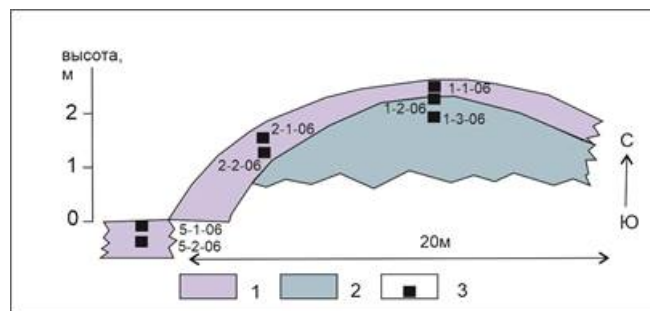


Рис. 5. Профиль самого крупного бугра в системе бугров пучения в котловине оз. Арахлей рядом с д. Преображенка, Забайкалье (по О.Е.Максимовой [\[18\]](#)): 1 – серо-бурая оторфованная супесь с корнями 2 – бурый пылеватый суглинок, 3 – точки отбора проб

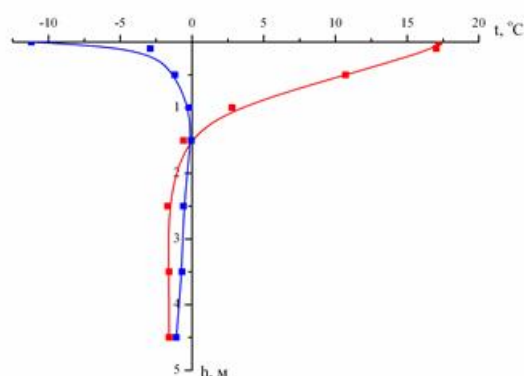


Рис. 6. График распределения температур в разрезе литальза на его склоне близ оз.Арахлей, Забайкальский край (из О.Е.Максимовой [\[18\]](#)).

Криогенное строение бугров

Литальза в долине р. Сенца. На поверхности первой террасы р. Сенца (абсолютная высота 1387 м) изучены и разбурены крупные литальза высотой от 4 до 7-9 м. Кровля ММП фиксируется на глубине 0,85-1,5 м (рис. 7). Верхняя часть разрезов изученных литальза представлена светло-коричневой супесью, которая подстилается голубовато-серым суглинком на глубине 6,3 м. Видимая льдистость грунта возрастает с глубины 1,35 м. Ниже разрез сложен ледогрунтом с базальной, иногда слоистой крупношлировой, криотекстурой. В многочисленных прослоях и линзах мощностью 3-5 см лед прозрачный с пузырьками округлой (диаметром 0,5-1,0 мм) и вытянутой формы. Местами лед белый непрозрачный. На глубине 6,3 м зафиксирован четкий контакт с голубовато-серой супесью, которая залегает до глубины 8 м. С глубины 8 м супесь сменяется голубовато-серым суглинком, содержит прослои прозрачного льда (до 5-6 см). Толщина прослоев суглинка 6-7 см, их криотекстура массивная.

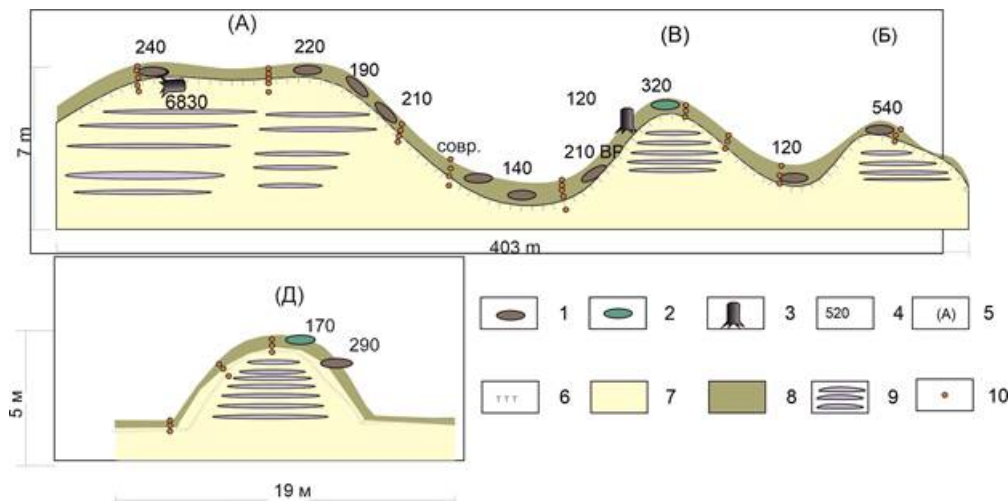


Рис. 7. Профили литальза в долине р. Сенца. По Vasil'chuk et al. [19] с дополнениями: 1 – линзы погребенного торфа; 2 – разложившаяся древесина; 3 – древесные остатки (корни, ветки); 4 – ^{14}C возраст, кал. лет назад; 5 – индекс литальза; 6 – граница сезонно-талого слоя; 7 – озерно-речной мёрзлый суглинок; 8 – сезонно-талый слой; 9 – ледяное ядро литальза. 10 – точки отбора проб на содержание С и N.

Пальза в Большеземельской тундре у пос.Елецкая. В пределах выпуклобугристого массива в районе пос. Елецкий ($67^{\circ}16'$ с.ш., $63^{\circ}39'$ в.д.) детально исследованы бугры пучения высотой от 1,5 до 5 м. Образцы отбирались из разрезов, расположенных в различных геоморфологических позициях: на вершинах, склонах и у подножий пальза, а также в ложбинах на вершинах бугров. В качестве примера типичного для данной локализации пальза приводится разрез бугра пучения высотой 2,5 м (18EI–VC.) Максимальная глубина протаивания на вершине бугра (в конце сентября) составляла 0.65 м. Пальза 18EI–VC имел плоскую, (а не выпуклую, как у большинства бугров на данном массиве) поверхность. Этот бугор в краевой части размыт озером, из обнажившейся стенки торфа отобран торф для ^{14}C датирования, а также для определения содержания углерода и азота (рис. 8).

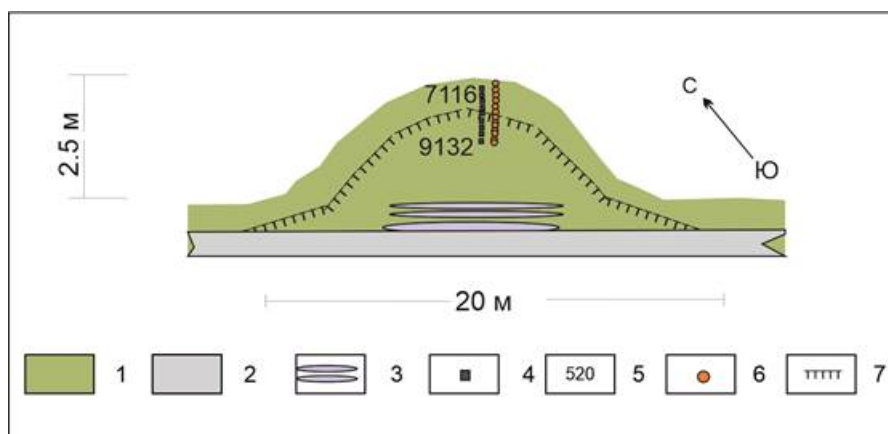


Рис. 8. Профиль пальза 18EI–VC у пос.Елецкая: 1 – торфа; 2 – суглинок серый; 3 – ледяное ядро; 4 – точки отбора проб на ^{14}C ; 5 – ^{14}C возраст, кал. лет назад; 6 – точки отбора проб на содержание С и N; 7 – граница сезонно-талого слоя.

Содержание органического углерода (С,) и азота (N)

Литальза в долине р. Сенца. Литальза на поверхности первой террасы р.Сенца характеризуются следующими показателями: в подстильно-торфяных и гумусовых почвенных горизонтах содержание азота (N) – 0,45-1,73% среднее значение – 0,83%,

содержание углерода (C) – 2,52-11,56%, среднее значение 6,86%, отношение C/N в диапазоне 6,2-12,9, среднее значение 9,33 (табл. 1).

Таблица 1. Содержание углерода и азота подстильно-торфяных и гумусовых почвенных горизонтах литальза в долине р.Сенца

№	Полевой номер	горизонт и глубина отбора, см	N, %	C, %	C, mol	N, mol	Ca/Na
1	Jse-16-2	O 0-3	0,80	5,64	0,47	0,06	8,24
2	Jse-16-3	O 0-3	0,70	5,65	0,47	0,05	9,46
3	Jse-16-9	O 0-3	1,33	11,56	0,96	0,1	10,13
4	Jse-16-14	OO-3	0,47	2,52	0,21	0,03	6,24
5	Jse-16-16	O 0-3 (10)	0,73	5,20	0,43	0,05	8,27
6	Jse-16-22	TO 0-27	1,73	11,25	0,94	0,12	7,57
7	Jse-17-2	AY 0-5(14)	0,47	3,94	0,33	0,03	9,77
8	Jse-17-4	Aypir 0-28	0,86	6,85	0,57	0,06	9,30
9	Jse-17-5	Av 0-2	1,01	11,23	0,94	0,07	12,92
10	Jse-17-7	OO - 3	0,51	5,22	0,43	0,04	11,88
11	Jse-17-13	0-2	1,27	11,30	0,94	0,09	10,41
12	Jse-17-14	OO-2	0,45	4,02	0,34	0,03	10,52
13	Jse-16-21	AY 0-5(16)	0,83	5,96	0,50	0,06	8,350
14	Jse-16-15	AT 0-3	0,82	5,30	0,44	0,06	7,55

У подножий литальза и в ложбине на вершине литальза зафиксированы самые высокие значения содержания углерода и азота, минимальные значения характерны для склонов. В разрезах литальза прослежены маломощные линзы мезофильного погребенного торфа. Для линз погребенного торфа характерны следующее: содержание N – 0,60-2,28% среднее значение – 1,31%, содержание C – 4,15-26,14%, среднее значение 12,68%, отношение C/N в диапазоне 7,78-13,76, среднее значение 10,58. В верхних частях литальза погребенные линзы торфа практически не встречаются, торф в процессе пучения был уничтожен. Самые высокие значения содержания углерода и азота отмечены в линзах торфа у подножий литальза, минимальные на склонах. Содержание азота и углерода в погребенном торфе в целом выше, чем в подстильных и гумусовых горизонтах.

В иллювиальном горизонте содержание N – 0,30-0,89% среднее значение – 0,54%, содержание C – 2,19-5,64%, среднее значение 3,73%, значение C/N в диапазоне 5,85-11,34, среднее значение 8,48. Включения угля и древесины пирогенного происхождения, обнаруженные в иллювиальном горизонте, характеризуются высоким

содержанием углерода 55,61% и средним для разрезов литальза содержанием азота 0,6%. Почвообразующая порода на участке с литальза представлена озерно-аллювиальными отложениями, в основном суглинками средними пылеватыми с агрегированно-скелетной микроструктурой, глинистость суглинка составляет 20-30% [20]. Содержание азота примерно такое же, как и в иллювиальном или в подстилочном горизонтах N – 0,31-1,60% среднее значение – 0,54%, содержание углерода также не сильно отличается от перекрывающих горизонтов. C – 1.3-9.06%, среднее значение 3.77%, значение C/N в диапазоне 4,30-11,15, среднее значение 8,36 [21].

Литальза у пос. Преображенка. Геохимическая характеристика литальза близ оз.Арахлей близка к характеристике литальза в долине р.Сенца по содержанию азота, содержание углерода в подстилочном горизонте значительно выше. В слое оторфованной супеси с корнями содержание азота (N) – 0,47-2,01% среднее значение – 1,26%, содержание углерода (C) – 2,27-21,60%, среднее значение 11,43%, отношение C/N в диапазоне 4,8-10,8, среднее значение 8,3. Отметим, что содержание и азота, и углерода в 1.2 метровом бугре заметно снижено по сравнению с более высоким 2,5 метровым литальза, среднее значение C/N для 2.5 метрового литальза 10.0, а для 1.2 метрового бугра – 6.03 (табл. 2).

Таблица 2. Соотношение углерода к азоту в разрезе литальза близ оз.Арахлей

Полевой номер		Глубина, см	N, %	C, %	Ca/Na
1-1-06. ОМ	Вершина литальза 2.5 м	0-20 см	2,01	21,60	10,75
1-2-06. ОМ		40-60 см	1,41	15,19	10,77
2-1-06. ОМ	Склон литальза 2.5 м	0-20 см	1,49	15,07	10,11
2-2-06. ОМ		30-50 см	1,10	9,19	8,35
3-1-06. ОМ	Вершина литальза	0-20 см	1,53	12,27	8,02
3-2-06. ОМ		20-40 см	0,84	4,40	5,24
4-2-06. ОМ	1.2 м	30-50 см	0,47	2,27	4,83

Пальза у пос. Елецкая В поверхностном слое пальза 18EI–VC, расположенного на периферии осушенной озерной котловины значения $\delta^{13}\text{C}$ варьируют в узких пределах от –27,77 до –29,50‰, средняя величина $\delta^{13}\text{C}$ составляет –28,61‰ (табл. 3).

Таблица 3. Содержание углерода, азота изотопный состав углерода в пальза 18EI–VC

Полевой №	Глубина отбора, см	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	N, %	C, %	Ca/Na	Калиброванный медианный возраст по ^{14}C , лет назад
18EI–VC/19	0.1	–28,43	3,326	34,783	13,07	
18EI–VC/20	0.3	–28,36	3,946	46,467	14,72	7116
18EI–VC/21	0.5	–27,84	3,256	47,123	18,09	7658
18EI–VC/22	0.7	–27,77	2,09	52,03	31,12	7832
18EI–VC/23	0.9	–28,04	3,486	45,059	16,16	8110
18EI–VC/24	1.1	–29,28	4,475	55,364	15,46	8163
18EI–VC/25	1.3	–28,13	3,106	48,105	19,36	8748
18EI–VC/26	1.5	–28,63	3,072	47,954	19,51	9132

Горизонт, м	Глубина, м	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	C, %	N, %	C/N	Значения
18EI-VC/27	38–40	–28,25	3,309	53,421	20,18	-
18EI-VC/28	45–50	–28,85	3,666	53,46	18,23	-
18EI-VC/29	50–64	–29,36	3,813	54,676	17,92	-
18EI-VC/30	65–68	–29,15	3,478	54,976	19,76	-
18EI-VC/31	68–78	–29,50	3,535	55,058	19,47	-
18EI-VC/32	78–82	–28,88	1,777	29,475	20,73	-
18EI-VC/33	82–85	-	1,332	1,105	1,04	-

В торфе максимальному значению $\delta^{13}\text{C}$ –27,77‰ соответствует локальный минимум содержания азота 2,09‰ и локальный максимум содержания углерода 52,03‰, а также максимальному значению C/N, составляющему 31,12, возможно торф из этого интервала соответствует мезотельму – граничному слою между акротельмом и катотельмом, поскольку ниже этого слоя корни современной растительности во время полевого изучения практически не встречались. На этом уровне прослеживается абсолютный пик значений отношения C/N 31,12. Величина содержания азота находится в интервале 1,777–4,475‰, среднее значение – 3,309‰. Содержание углерода составляет 29,48–55,36‰, среднее значение содержания углерода – 48,43‰, при этом минимальное значение приходится на граничный с подстилающим суглинком слой торфа. Переход от талого торфа к мерзлому на глубине 0,4 м не отмечен изменениями изученных показателей. В суглинке, подстилающем торф, содержание углерода и азота снижено, показатель C/N близок к единице. Степень разложения торфа на изотопном составе торфа и на содержании азота и углерода не отразилась.

Анализ полученных радиоуглеродных датировок пальяза массива у пос.Елецкая показывает, что торфонакопление в отдельных локациях началось в самом начале голоцена, около 11 тыс. кал. лет назад, а около 9–8 тыс. кал. лет назад аккумуляция торфа происходила, скорее всего, уже на всей площади данного массива, судя по тому, что придонный торф во всех буграх имеет возраст 9,1–8,2 тыс. кал. лет назад.

Дискуссия

История изучения литальза и пальяза в России

Российские исследователи еще в начале прошлого века выделили минеральные бугры пучения, Ряд исследователей – Н.И.Прохоров, О.И.Кузенева, А.Н.Левицкий, В.С.Доктуровский и Н.В.Квашнин-Самарин [\[3, стр. 73\]](#), наблюдавшие бугры пучения в Верхнезейской котловине, в западной части Амурской области и в бассейне р.Мамына, считали, что образование бугров обусловлено способностям пльвуна под влиянием газов или при его движении по неровной поверхности многолетнемёрзлых пород, поднимать, вспучивать и даже прорывать верхние почвенные горизонты. С.Л.Кушев [\[4\]](#) летом и осенью 1933 г. исследовал бугристые мари с торфяными и минеральными буграми пучения в южной части Верхнезейской котловины, в Огоронской котловине и в долине верхнего течения р.Деп. Сведения о буграх пучения на многолетнемёрзлых марях по сообщению С.Л.Кушева приводятся В.В.Стратоновичем для правобережья р.Зеи между рр.Бомнаком и Током, П.Риппасом – для долины р.Деп, В.С.Доктуровским – для долины р.Норы (им даже составлена ботаническая карта, на которой показаны районы наибольшего распространения бугристых марей), Крюковым – для Селемджино-Уньминского района. С.Л.Кушев [\[4\]](#) указал, что распространение бугров пучения на болотных марях весьма обширно: из долины р.Уньмы, левого притока р.Селемджи, бугристые мари распространяются вверх по р.Селемдже, заходят в долину левого ее

притока р.Быссы, переходят в бассейн рр. Норы и Мамина, правых притоков р.Селемджи, затем в бассейны среднего и верхнего течения р.Деп и его левых притоков, главным образом Нинни и Тунгалы, и правого – В. Джугдагин. К северу от хребтов Тукурингры и Джагды бугристые мари широко распространены в Верхнезейской котловине и далее на запад – в бассейнах рр.Врянты, Унахи, Иликана, Верхнего Гилюя и Тынды. Еще далее на запад, в пределах Забайкалья, бугристые мари прослеживаются примерно до р.Нерчи^[4]. Типичные бугристые мари развиты на плоских заболоченных вершинах увалов южной части Верхнезейской котловины. Многочисленные бугры пучения самой разнообразной формы, то в виде правильно округлых овалов, то разветвленных в разные стороны повышений, имеют различные размеры в длину и ширину (от метра и более), достигая высоты 0,5-1,0 м. Местами, на склонах некоторых бугров, встречаются заплывшие трещины (до 2-5 см шириной), проходящие извилисто и более или менее параллельно линии подошвы бугров. На вершинах и склонах бугров встречаются лиственница, реже – сосна и береза, нижние части некоторых стволов приобрели дугообразную форму, деревья наклонены в разные стороны под различными углами («пьяный лес»). Основание бугристых марей и сами бугры сложены иловато-пылеватыми, тяжелыми, средними и легкими суглинками. Понижения между буграми заполнены переувлажненным темным торфяно-илистым материалом, мощностью до 0,8-1,2 м^[4]. Кровля многолетнемёрзлых пород имеет волнистое залегание, обратное поверхности микрорельефа бугристого болота. Мерзлые породы под буграми залегают на глубине 1,8-2,5 м, между буграми, в понижениях – на 0,80-1,20 м, причем под буграми кровля многолетнемёрзлых пород в большинстве случаев ниже на 15-50, иногда на 75 см, чем под понижениями. С.Л.Кушев^[4] привёл схему формирования выпуклого бугра пучения – бугра-могильника. Первично, по его мнению, небольшие бугры образуются в процессе зимнего промерзания изолированных друг от друга увлажненных линз грунта, в которых, развиваются значительные гидростатические напряжения. Бугристая марь исследована А.Н.Толстовым^[5] в южной части криолитозоны (в 60-80 км к северо-востоку от ее южной границы), в районе среднего течения реки Буреи, на местном водоразделе, расположенном в 5 км к востоку от нее. Вся водораздельная часть покрыта бугристой марью с редким лиственничным лесом и с густой кустарниковой растительностью (брусника, болиголов, голубица, ерник). Между буграми развит плотный моховой покров (сфагнум), причем в некоторых западинах он насыщен водой, в других отмечено свободное зеркало воды. При вскрытии бугров траншеями установлено наличие многолетнемёрзлых пород на глубине 1,8 м. Кроме того, большое количество выработок (зондировочных скважин и шурфов), произведенных в 1942-1943 гг., подтвердило наличие здесь многолетнемёрзлых толщ мощностью 20-45 м. Выпуклые бугры на исследованном участке имели вид холмов с плоскими вершинами, диаметром от 1,5 до 4 м и высотой от 0,2 до 0,8 м и даже до 1,2 м (превышение над западиной), их чаще называют буграми-могильниками. Вершины бугров в большинстве случаев были сухие с выступающими на поверхность минеральными грунтами. Влажность за время наблюдений на глубине 0,5 м колебалась от 27% (северный край бугра) до 48% (центр бугра) и на глубине 1 м – от 16 % (северный край бугра) до 44% (центр бугра). Самые низкие температуры в центре бугра на глубине 2,5 м составили –0,5°, а в западине, на той же глубине –0,75°С^[5]. Мощность шлиров льда в разрезах бугров достигала 2-2,5 см, причём наиболее льдистыми были грунты близ подошвы сезонно-талого слоя. На основании полученных материалов А.Н.Толстов^[5] заключил, что процесс образования бугров-могильников в естественных условиях протекает весьма медленно – в течение многих десятков лет. На это указывают 120-150-летние саблевидно-искривленные лиственницы, растущие на буграх. Бугристая марь приурочена к участкам поверхностей,

сложенных глинистыми и суглинистыми грунтами, с уклонами менее 0,02, так как при наличии таких уклонов не обеспечивается достаточно быстрый сток атмосферных осадков и вода проникает в грунт. Бугры-могильники на исследованном участке бугристой мари имели вид бугров с плоскими вершинами диаметром от 1,5 до 4,0 м и высотой от 0,2 до 1,2 м (превышение над минеральным дном западины). Мощность деятельного слоя на бугристой мари колебалась под западинами в пределах от 0,75 до 1,25 м и под буграми в пределах от 1,6-до 2 м. Минеральный грунт, слагающий собственно тело бугра, является более сухим по отношению к грунтам периферийных частей его (т.е. залегающим в западинах). Торф наибольшей мощности был зафиксирован под южными западинами с языками, вытянутыми под буграми. А.Н.Толстов^[5] высказал предположение о том, что бугры-могильники образуются за счет пучения грунтов и гидростатического напряжения.

Углерод и азот в пальза и литальза

Согласно обобщению результатов определения содержания углерода в органическом веществе в 268 торфяных кернах из 215 участков, расположенных к северу от 45 градуса с.ш.^[22] в торфе, образованном сфагновым мхом содержание углерода в среднем составляет $42 \pm 3\%$ (стандартное отклонение) для торфа, в котором сфагновые мхи отсутствуют - $51 \pm 2\%$, в среднем для торфа северных торфяников содержание углерода в органическом веществе составляет $49 \pm 2\%$. Содержание азота наименьшее у сфагнового торфа ($0,7 \pm 0,3\%$) и наибольшее у травянистых сосудистых растений ($1,7 \pm 0,6\%$), среднее значение оценивается в $1,2 \pm 0,7\%$. Исходя из этих цифр можно также оценить среднее значение отношение углерода к азоту (C/N) в бореальных торфяниках величиной 45.3. Геохимическая характеристика массивов литальза (см. табл. 1, 2) и пальза (см. табл. 3, 4) несколько отличается.

Сопоставление содержания азота и углерода в почвенном покрове литальза и торфяном покрове пальза демонстрирует как общие черты так и различия. Содержание азота в поверхностных слоях литальза (0,45-1,73% в долине р.Сенца и 0,47-2,01% у оз.Арахлей) находится примерно в том же диапазоне, что и в поверхностных горизонтах пальза независимо от региона криолитозоны. Например, в районе Игарки содержание азота в торфяном покрове пальза составляет (0,37-3,26%)^[23,24], в Большеземельской тундре близ пос. Сейда содержание азота в торфяном покрове пальза 1,2-2,9%^[25]; а в провинции Квебек в торфе на поверхности пальза среднее содержание азота 1,8%^[26]. В торфе плоскобугристого болота в северной тайге Западной Сибири содержание азота также в среднем составляет 0,67%^[27]. В пальза массивах на севере Швеции содержание азота составляет 0,7-3,7%^[28]. Очевидно, что содержание азота в поверхностных горизонтах почв и торфяников в зоне развития многолетнемерзлых пород находится в довольно узком диапазоне. Но в отличие от литальза содержание углерода в поверхностных горизонтах пальза и плоскобугристых и полигональных торфяников многократно превышает полученные нами значения как для поверхностных, так и для погребенных органических горизонтов почвенного покрова литальза (табл. 4.)

Таблица 4. Содержание углерода, азота значение Ca/Na в пальза –массивах Северного полушария

Регион развития пальза или пальза-плато	Азот,%	Углерод,%	Ca/Na	источник
Давва, Швеция	1-3,7	19,4-48	13,2-38	Hichens-Bergström,

68°27.8470' с.ш., 20°54.4184' в.д.,				Sannel [28]
Риба, Швеция,	0,7-2,8	20-50	25-40	
68°28.6469' с.ш., 21°00.1786' в.д.				
Лаксев,	1-2,2	21-56	20-48,6	
Норвегия 70°07.2509' с.ш., 24°59.7747' в.д.				
Карлебот, Норвегия 70°07.2314' с.ш., 28°28.4917' в.д.	1,2-2,2	32-53	20-35	
Кёутукейну,	0,6-2,9	38.3-48.9	16-65	Wetzel, Fleige, Horn [29]
69°00'43" с. ш. 23°02'37" в. д. Норвегия	1,2-3,1	21.4-49.1	15-18	
Торф пальза				
Лед пальза				
Стордален			19-90	Krüger, Leifeld, Alewell [30]
Швеция				
68° 210 с. ш., 18° 490 в.д.				
Сторфлакет Швеция 68° 21'с. ш., 18° 49' в.д.			20-99	
Торнетрекс(68° 21'с. ш., 18° 49'в.д.)			50-120	
Швеция				
Скалуваара (69°49'13" с. ш., 27°9'47"в.д.)			26-29	Palmer, Horn [31]
Финляндия				
Ханымей (63°43' с. ш. 75°57' в. д.)	0.7-1.0	48-64	50-72	Лим и др. [27]
Зотино (60°04' с. ш., 89°23'в.д.) Россия	0.35-3.86	23.3-58	13-129	
Игарка (67°31' с. ш., 86°38'в.д.), Россия	0.37-3.26	17-54.7	14-134	Prokushkin, Novenko et al. [23]
Р. Сейда	1.2-2.9	35 - 50	20-25	
Большеземельская тундра (67°00-67°20 с.ш., 61°40' -63°00в.д') Россия				Пастухов, Каверин [25]
Оз. Селвин 59°53' с.ш., 104°12' з.д. Канада	0.2-0.5	42.2 - 44.9	82 - 240	
Оз.Эннадай 60 °50 'с.ш., 101 °33 ' Канада	0.3-0.8	40.7- 47.7	26 - 144	Sannel, Kuhry [32]
Кууджуарапик-Вапмагоостюи	0.9-2.3	20-48	27-67	
				Deshpande et al. [26]

(55°17' с.ш., 77°47' з.д.)**Канада**

Почвы криогенных ландшафтов лیتالъза в долине р. Сенца характеризуются довольно высокой вариабельностью показателя C/N от 4,3 в почвообразующей породе до 13,4 в погребенном торфяном горизонте. Максимальное значение C/N = 101,20 установлено образце иллювиального горизонта BHF, что обусловлено присутствием в данном слое большого количества пирогенных включений угля и древесины (C – 55,6%, N – 0,64%). Специфический химический состав данных включений (высокое содержание углерода и пониженное азота) обусловлен их термической трансформацией органики. Анализ распределения C/N в генетических горизонтах исследованных почв показал, что наиболее высокие средние значения данной величины наблюдаются прослоях и линзах погребенного торфа (среднее значение 10,58, при диапазоне значений 7,8-13,4). Самые высокие значения содержания углерода и азота, были отмечены у подножий лیتالъза в подстилочном и в иллювиальном горизонте лیتالъза на высокой пойме, минимальные в разрезе ложбины на вершине лیتالъза и в иллювиальном горизонте почвенного профиля на высокой террасе. Содержание азота и углерода практически не изменяется при переходе из иллювиального горизонта к материнской породе, т.е. преобразования органического вещества в иллювиальном горизонте не происходило. Средняя величина C/N в органических и органо-минеральных горизонтах составляет 9,33, диапазон значений совпадает с погребенными торфяными слоями (6,2-12,9). Это позволяет говорить о довольно быстрой криогенной консервации погребенного слоя торфа при формировании лیتالъза, что скорее всего связано с подтоплением. Минимальные значения C/N установлены для иллювиального горизонта почв и почвообразующей породы (8,48 и 8,36). Снижение значений C/N в этих горизонтах обусловлено некоторым ростом содержания минеральных форм азота в результате их выноса из верхних горизонтов почв. Оценивая распределение содержания углерода и азота, а также их отношение в подстилочных и торфяных горизонтах лیتالъза, относительно их радиоуглеродного возраста отметим, что чем выше среднее значение C/N в этих горизонтах, тем старше лیتالъза, за счет снижения содержания азота, который вероятно перерабатывается почвенными микроорганизмами. Для лیتالъза, находящегося в зоне выпаса такой закономерности не отмечается поскольку этот лیتالъза находится в зоне выпаса и поступление органического вещества на поверхность лیتالъза С обусловлено в первую очередь присутствием животных.

Хотя палъза –торфяники, являющиеся природным резервуаром углерода, играют важную роль в процессах глобального круговорота углерода, не смотря на огромные запасы углерода, бедны питательными веществами и имеют более высокое соотношение углерода к азоту (C:N), чем торфяники низких широт, поскольку углерод в экосистеме накапливается, в то время как азот циркулирует и используется и микроорганизмами и растительностью [\[30,33,34\]](#).

Содержание азота в поверхностных слоях лیتالъза (0,45-1,73%) находится примерно в том же диапазоне, что и в поверхностных горизонтах палъза независимо от региона криолитозоны. Например, в районе Игарки (67°31'N, 86°38'E) [\[23,24\]](#) (Prokushkin et al., 2022, Novenko et al., 2022) содержание азота в торфяном покрове палъза составляет (0,37-3,26%), в Большеземельской тундре (67°00– 67°20 N, 61°40–63°00E) [\[25\]](#) содержание азота в торфяном покрове палъза 1,2–2,9%; а в провинции Квебек в торфе на поверхности палъза (55°17'0 N, 77°47'0 W) [\[26\]](#) среднее содержание азота 1,8%. В торфе плоскобугристого болота в северной тайге Западной Сибири (63°47'50''N;

75°33'22''E) содержание азота также в среднем составляет 0,67% [27], в торфяном покрове полигонального болота содержание азота находится в интервале 0,9-2,2% [35]. Очевидно, что содержание азота в поверхностных горизонтах почв в зоне развития многолетнемерзлых пород находится в довольно узком диапазоне. Но в отличие от литальза содержание углерода в поверхностных горизонтах пальза и плоскобугристых и полигональных торфяников многократно превышает полученные нами значения как для поверхностных, так и для погребенных органических горизонтов почвенного покрова литальза. Почвы криогенных ландшафтов литальза в долине р. Сенца характеризуются довольно высокой вариабельностью показателя C/N от 4,3 в почвообразующей породе до 13,4 в погребенном торфяном горизонте. Максимальное значение C/N = 101.20 установлено образце иллювиального горизонта BHF, что обусловлено присутствием в данном слое большого количества пироженных включений угля и древесины (C – 55,6%, N – 0,64%). Специфический химический состав данных включений (высокое содержание углерода и пониженное азота) обусловлен их термической трансформацией органики. Анализ распределения C/N в генетических горизонтах исследованных почв показал, что наиболее высокие средние значения данной величины наблюдаются в прослоях и линзах погребенного торфа (среднее значение 10,58, при диапазоне значений 7,8-13,4). Самые высокие значения содержания углерода и азота, за исключением образца пироженного материала, были отмечены у подножий литальза в подстилочном и в иллювиальном горизонте литальза на высокой пойме, минимальные в разрезе ложбины на вершине литальза А и в иллювиальном горизонте почвенного профиля на высокой террасе. Содержание азота и углерода практически не изменяется при переходе из иллювиального горизонта к материнской породе, т.е. преобразования органического вещества в иллювиальном горизонте не происходило. Средняя величина C/N в органических и органо-минеральных горизонтах составляет 9,33, диапазон значений совпадает с погребенными торфяными слоями (6,2-12,9). Это позволяет говорить о довольно быстрой криогенной консервации погребенного слоя торфа при формировании литальза, что скорее всего связано с подтоплением. Минимальные отношения углерода и азота установлены для иллювиального горизонта почв и почвообразующей породы (8,48 и 8,36). Снижение отношения C/N в этих горизонтах обусловлено некоторым ростом содержания минеральных форм азота в результате их выноса из верхних горизонтов почв. Оценивая распределение содержания углерода и азота, а также их отношение в подстилочных и торфяных горизонтах литальза А, В, D, относительно их радиоуглеродного возраста отметим, что чем выше среднее значение C/N в этих горизонтах, тем старше литальза, за счет снижения содержания азота, который вероятно перерабатывается почвенными микроорганизмами. Для литальза С такой закономерности не отмечается поскольку этот литальза находится в зоне выпаса и поступление органического вещества на поверхность литальза С обусловлено в первую очередь присутствием животных.

Сопоставляя значения C/N для пальза и литальза отметим, что для пальза эта величина не опускается ниже 13-14, такие значения встречены только в пальза массивах Швеции [28] и Енисейской Сибири [23], а в основном выше 20, в то время как этот показатель для литальза никогда не превышает 10-12. Исключение составляют только пироженные горизонты.

Выводы

1. Пальза и литальза являются самыми распространенными формами пучинного криогенного рельефа, обычно они содержат большое количество сегрегационного льда.

2. Основное различие их состоит в том, что палъза состоит из торфяно-минерального ядра и перекрыто торфом, а литалъза в основном состоит из минерального ядра, почти лишенного торфа, и на поверхность, как правило выходят минеральные породы.

3. Соотношение углерода к азоту в разрезах литалъза не превышает 10-12, тогда как в разрезах палъза это соотношение не менее 14, а обычно составляет 30-40 и иногда превышает 100.

Библиография

1. *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms in Chinese, English, French, German, Icelandic, Italian, Norwegian, Polish, Romanian, Russian, Spanish, and Swedish*. Compiled and Edited by: Robert O. van Everdingen The Arctic Institute of North America The University of Calgary Calgary, Alberta, CANADA T2N 1N4. 1998 (revised 2005)
2. Harris S.A. Palsa-like mounds developed in a mineral substrate, Fox Lake, Yukon Territory // *Proceedings, Sixth International Conference on Permafrost*, Beijing, 1993, South China University of Technology Press, Vol.1. Pp. 238–243.
3. Квашнин-Самарин Н.В. О некоторых наблюдениях над микрорельефом мерзлоты и его значение // *Материалы по изучению русских почв*. Вып. 23. 1913. С. 73–89.
4. Кушев С.Л. Морфология и генезис бугристых марей и их географическое распространение // *Труды Комитета по вечной мерзлоте*. Том 8. 1939. М.-Л.: Изд-во АН СССР. С. 119–161.
5. Толстов А.Н. Некоторые наблюдения над буграми-могильниками в среднем течение реки Буреи // *Труды института мерзловедения им. В.А.Обручева, том 8. Вечная и сезонная мерзлота Забайкалья*. М.: Изд-во АН СССР. 1950. С. 149–171.
6. Åhman R. The structure and morphology of minerogenic palsas in northern Norway // *Biuletyn Peryglacjalny*, 1976, N 26, p. 25–31.
7. Dionne J.-C. Formes et phenomenes periglaciaires en Jamesie, Québec subarctique // *Géographie physique et Quaternaire*. 1978. Vol. 32. Pp. 187–247.
8. Lagarec D. Cryogenic mounds as indicators of permafrost conditions, northern Québec // *Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference, Roger Brown Memorial Volume*. Ottawa, Canada. 1982. Pp. 43–48.
9. Allard M., Seguin M.K., Levesque R. Palsas and mineral permafrost mounds in northern Quebec // *International Geomorphology, Part II*, Ed. V. Gardiner, London, John Wiley. 1986. Pp. 285–309.
10. Pissart A. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report // *Progress in Physical Geography*. 2002. Vol. 26. Pp. 605–621.
11. Iwahana G., Fukui K., Mikhailov N., Ostanin O., Fujii Y. Internal Structure of a Lithalsa in the Akkol Valley, Russian Altai Mountains // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012. Vol. 23. Pp. 107–118. doi:10.1002/ppp.1734
12. Budantseva N.A., Gorshkov E.I., Isaev V.S., Semenov I.N., Usov A.N., Chizhova Ju.N., Vasil'chuk Yu.K. Engineering geological and geochemistry features of the palsa and lithalsa landscape in the area of educational and scientific polygon Khanovey. Engineering Geology. 2015. Vol. 3. Pp. 34–50.
13. Vasil'chuk Yu.K., Alekseev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Arzhannikova A.V., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C. Chizhova Ju.N. Isotope composition of a Lithalsa in the Sentsa River Valley (East Sayan Mountains) // *Doklady Earth Sciences*. 2016. Vol. 471. Part 2. Pp. 1292–1297. doi: 10.1134/S1028334X16120254

14. Vasil'chuk Yu.K., Alekseev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Arzhannikova A.V., Vasilchuk A.C. Lithalsa in the Sentsa River Valley, Eastern Sayan Mountains, Southern Russia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. Vol. 27. Iss. 3. Pp. 285–296. doi: 10.1002/ppp.1876
15. Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н., Блудушкина Л.Б., Васильчук Ю.К. Стабильные изотопы кислорода, водорода и углерода и возраст палыза близ поселка Елецкий, северо-восток Большеземельской тундры // *Арктика и Антарктика*. 2017. №4. С. 38–56 doi: 10.7256/2453-8922.2017.4.25087.
16. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Sulerzhitsky L.D., Budantseva N.A., Volkova Ye.M., Chizhova Ju.N. Radiocarbon chronology of palsa in the Bol'shaya Zemlya tundra // *Doklady Earth Sciences*. 2003. Vol. 393. N8. Pp. 1160–1164.
17. Vasil'chuk, Yu.K., Vasil'chuk, A.C., Jungner, H., Budantseva, N.A., Chizhova, Ju.N. Radiocarbon chronology of Holocene palsa of Bol'shezemel'skaya tundra in Russian North // *Geography, Environment, Sustainability*. 2013. Vol. 6. N3. Pp. 38–59. doi: 10.24057/2071-9388-2013-6-3-38-59.
18. Максимова О.Е. *Бугры пучения южного Забайкалья* / Дипломная работа выполненная на кафедре криолитологии и гляциологии географического ф-та МГУ под рук. проф. Ю.К.Васильчука. М. 2007. 131 с.
19. Vasil'chuk, Yu. K., Vasil'chuk, J. Yu., Alexeev, S.V., Budantseva, N. A., Alexeeva, L. P., Vasil'chuk, A. C., Kozyreva, Ye. A., Svetlakov, A. A. The Cyclical Structure of the Isotopic Diagram of a Lithalsa and Its Radiocarbon Age, Sentsa River Valley, Eastern Sayan // *Doklady Earth Sciences*, 2019, Vol. 489, Part 2. Pp. 1456–1460. doi: 10.1134/S1028334X19120158
20. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Васильчук Ю.К., Козырева Е.А., Светлаков А.А., Рыбченко А.А. (2016). Бугры пучения в дорлине реки Сенца, Окинское плоскогорье, Восточный Саян // *Успехи современного естествознания*. № 3. С. 121–126.
21. Васильчук А.К., Васильчук Дж.Ю., Буданцева Н.А., Васильчук Ю.К., Терская Е.В., Кречетов П.П., Блудушкина Л.Б. Соотношение содержания углерода и азота в почвах литальза-ландшафтов в долине р. Сенца, Восточный Саян // *Арктика и Антарктика*. 2020. № 1. С. 75–97. doi: 10.7256/2453-8922.2020.1.32245.
22. Loisel, J., Yu, Z., Beilman, D. W., Camill, P., Alm, J., Amesbury, M. J., Anderson, D., Andersson, S., Boicchio, C., Barber, K., Belyea, L. R., Bunbury, J., Chambers, F. M., Charman, D. J., De Vleeschouwer, F., Fialkiewicz-Koziel, B., Finkelstein, S. A., Galka, M., Garneau, M. et al. A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation // *The Holocene*. 2014. Vol. 24(9). Pp. 1028–1042. doi:10.1177/0959683614538073.
23. Prokushkin A.S., Novenko E.Yu., Kupriyanov D.A., Karpenko L.V., Mazei N.G., Serikov S.I. Carbon, nitrogen and their stable isotope ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) records in two peat deposits of Central Siberia: raised bog of middle taiga and palsa of forest-tundra ecotone // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 2022. 1093: 012007 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/1093/1/012007
24. Novenko EY, Mazei NG, Prokushkin AS, Kupriyanov DA, Shatunov AE, Andreev RA, Serikov SI. The Holocene palaeoecology of the palsa mire near Igarka (Yenisei Siberia). In: *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2022:1093:012029 doi:10.1088/1755-1315/1093/1/012029
25. Пастухов А.В., Каверин Д.А. Экологическое состояние мерзлотных бугристых торфяников на северо-востоке Европейской России // *Экология*. 2016. №2. С. 94–102.

26. Deshpande, B.N., Crevecoeur, S., Matveev, A., Vincent, W.F. (2016). Bacterial production in subarctic peatland lakes enriched by thawing permafrost // *Biogeosciences*, 13, 4411–4427. doi:10.5194/bg-13-4411-2016
27. Lim, A. G., Loiko, S. V., A.G., Raudina T.V., Volkova I.I., Seredina V.P. (2018). Element composition of peat deposits in flat frost mound bogs of the Pyakupur River (northern taiga of West Siberia). *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 79-87.
28. Hichens-Bergström, M., Sannel, B.K. (2023). Permafrost development in northern Fennoscandian peatlands since the mid-Holocene, Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 55:1, 2250035, DOI: 10.1080/15230430.2023.2250035
29. Wetzel, H., Fleige, H., Horn, R. (2003). Chemical and physical properties of palsas – degradation of palsas in the region of Northern Norway. In: Permafrost, Eighth International Conference, Proceedings. Zurich, 21-25 July 2003. Eds: by M.Philips, S.M.Springman, L.U.Arenson. Vol. 2. Zurich, Switzerland. A.A.Balkema Publishers. Swets & Zeitlinger B.V. Lisse. The Netherlands. Pp. 1235–1240.
30. Krüger J.P., Leifeld J., Alewell C. Degradation changes stable carbon isotope depth profiles in palsa peatlands // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11. Pp. 3369–3380. doi:10.5194/bg-11-3369-2014
31. Palmer K., Horn M.A. Actinobacterial Nitrate Reducers and Proteobacterial Denitrifiers Are Abundant in N₂O-Metabolizing Palsa Peat. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012. Vol. 78. N16. Pp. 5584 –5596
32. Sannel A. B. K., Kuhry P. (2009). Holocene peat growth and decay dynamics in sub-arctic peat plateaus, west-central Canada // *Boreas*. Vol. 38. Pp. 13–24. 10.1111/j.1502-3885.2008.00048.x.
33. Krüger J. P., Leifeld J., Alewell C. Degradation changes stable carbon isotope depth profiles in palsa peatlands // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11. Pp. 3369–3380.
34. Krüger J. P., Conen F., Leifeld J., Alewell C. Palsa uplift identified by stable isotope depth profiles and relation of $\delta^{15}\text{N}$ to C/N ratio // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017. Vol. 28. Pp. 485–492. doi: 10.1002/ppp.1936.
35. Голубятников Л.Л., Заров Е.А. Содержание углерода и азота в торфяных почвах северных районов Западной Сибири // *Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Материалы Шестого Международного полевого симпозиума*. Издательство: Изд-во Томского ун-та. 2021. С.113–115.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Предмет исследования являются, по мнению автора, возможность использования величины отношения углерода к азоту как критерий разделения пальза и литальза как объект изучения геокриологи, которые ранее отечественные геокриологи ранее не выделяли, а в тех случаях, когда минеральные бугры встречались их называли бугристыми марями, буграми-могильниками.

Методология исследования, как указано в статье состояло в определении содержания органического углерода (C_o) и азота (N), из разрезов пальза и литальза отбирались образцы торфа и почвенных горизонтов объемом около 1-0,5 см³. Пробы подвергались сублимационной сушке, а образцы помещались в капсулы из фольги, взвешивались для измерения процентного содержания азота и углерода в лаборатории геохимии ландшафтов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв Географического

факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.. Судя по иллюстративным материалу автором предпринятой экспедиционные полевые методы исследования, с последующих камеральной обработкой.

Актуальность затронутой темы безусловна вызывают у исследователей повышенный интерес в связи с оценкой эмиссии парниковых газов и изменением продуктивности тундровых ландшафтов и состоит в получении информации о содержании азота и углерода в Арктике и Субарктике а также с тем, что бугры пучения – пальза и литальза - являются надежным индикатором наличия многолетнемерзлых пород особенно на южной границе их распространения.

Научная новизна заключается в попытке автора статьи на основе проведенных исследований сделать вывод об неопределенности оценок динамики углерода в различных временных масштабах, разные подходы требуют дальнейшего изучения этих сложных природных систем. Сопоставляя значения C/N для пальза и литальза отметим, что для пальза эта величина не опускается ниже 13-14, такие значения встречены только в пальза массивах Швеции и Енисейской Сибири, а в основном выше 20, в то время как этот показатель для литальза никогда не превышает 10-12, исключение составляют только пирогенные горизонты. Автором статьи предлагается критерий разделения криогенных геоморфологических форм по величине отношения углерода к азоту как критерий разделения пальза и литальза.

Стиль, структура, содержание стиль изложения результатов достаточно научный. Статья снабжена богатым иллюстративным материалом, отражающим процесс образования льда в почве. Автором подробно изучить геохимические криолитологические процессы. В лабораторных условиях рассмотрены процессы изучения перераспределения химического состава, что делает представленные автором статьи результаты весьма интересными.

Автору удалось поработать над оформлением фотографий, табличного материала в форме графиков и диаграмм, что позволило повысить наглядность и аргументированность представленных материалов.

Из приведённых автором направлений следует отметить особенно интересный кроме изучения особенностей химического состава грунтов.

Библиография весьма исчерпывающая для постановки рассматриваемого вопроса, но не содержит ссылки на нормативно-правовые акты и методические рекомендации по геохимическому анализу особенности грунтов.

Апелляция к оппонентам представлена в выявлении проблемы на уровне имеющейся информации, полученной автором в результате анализа.

Выводы, интерес читательской аудитории в выводах есть обобщения, позволившие применить полученные результаты. Целевая группа потребителей информации в статье не указана.