See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/373829719

# Stages of development of fluidogenic landforms on the shelf of the Pechora sea (in Russian)

Conference Paper · September 2023

citations 0		reads 12	
4 authors, including:			
	Ekaterina Eremenko Lomonosov Moscow State University 20 PUBLICATIONS 34 CITATIONS SEE PROFILE	(a)	A. V. Kokhan 39 PUBLICATIONS 66 CITATIONS SEE PROFILE
	Evgeny Moroz Russian Academy of Sciences 46 PUBLICATIONS 70 CITATIONS SEE PROFILE		

## ХХХVІІ ПЛЕНУМ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КОМИССИИ РАН

### ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

5–10 сентября 2023 года г. Иркутск



Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук Институт географии Российской академии наук Ассоциация геоморфологов России

## ХХХVІІ ПЛЕНУМ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КОМИССИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием

(Иркутск, 5-10 сентября 2023 года)

Тезисы докладов

Иркутск 2023 УДК 551.4+551.8 ББК 26.823+26323 Т 671

Председатель Оргкомитета конференции: д.г.н. Ю.В. Рыжов (отв. ред.) Оргкомитет: д.г.н. В.М. Плюснин, д.г.н. О.И. Баженова, к.г.н. М.Ю. Опекунова, вед. инж. М.В. Смирнов

XXXVII пленум Геоморфологической комиссии Российской академии наук:
Т 671 Тезисы докладов всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Иркутск, 5–10 сентября 2023 года). – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2023. – 368 с.

XXXVII Plenum of the Geomorphological Commission of the Russian Academy of Sciences. Abstracts of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation (Irkutsk, September 5–10, 2023). Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2023. 368 p.

ISBN 978-5-6046471-2-7

Тематика работ, представленных в сборнике, охватывает широкий круг вопросов, связанных с геоморфологией и палеогеографией. Публикуемые статьи разделены на 12 основных направлений: структурная геоморфология и неотектоника, климатическая геоморфология, флювиальная геоморфология, геоморфология аридных зон, гляциальная и перигляциальная геоморфология, склоновые процессы и формы рельефа, прикладная геоморфология, геоархеология, антропогенная геоморфология, логия, планетарная геоморфология, история геоморфологии, экологическая геоморфология.

Сборник адресован широкому кругу специалистов в области геоморфологии и палеогеографии, четвертичной геологии, а также студентам и аспирантам вузов соответствующих специальностей.

> УДК 551.4+551.8 ББК 26.823+26.323

Утверждено к печати Ученым советом ИЗК СО РАН (протокол № 7 от 29.06.2023)



10. Сафьянов Г.А., Меншиков В.Л., Пешков В.М. Подводные каньоны – их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2001. 197 с.

11. Ван В.Г., Еременко Е.А., Кажукало Г.А., Котенков А.В., Кузнецов М.А., Смирнова А.П., Смирнова В.В., Смирнова С.В., Авдонина А.М., Алексеева А.И. и др. Морфогенетические типы берегов Абхазии и современные тенденции развития береговой зоны // Исследования молодых географов: Сборник статей участников зимних студенческих экспедиций / Ред. М.С. Савоскул, Н.Л. Фролова. М.: Издатель Ерхова И.М., 2022. С. 33–45.

#### СТАДИИ РАЗВИТИЯ ФЛЮИДОГЕННЫХ ФОРМ НА ШЕЛЬФЕ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

Е.А. Еременко<sup>1,2</sup>, А.В. Кохан<sup>1</sup>, Е.А. Мороз<sup>1</sup>, А.П. Денисова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, г. Москва, Россия, kkkkk1987@mail.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Аннотация. По результатам многолучевого эхолотирования и высокочастотного сейсмического профилирования, выполненных в рамках рейсов научно-исследовательского судна «Академик Николай Страхов» в 2018–2019 гг., выявлены стадии развития флюидогенного рельефа на дне северной части Печорского моря. Установлено, что в условиях наличия деградирующей многолетней мерзлоты дегазация приводит к последовательному формированию на поверхности дна валов «пучения», рвов и пингоподобных форм разного размера. Неоднократно зафиксированные в районах распространения пингоподобных форм акустические аномалии в водной толще, связанные с подъемом и рассеиванием флюидов, а также хорошая морфологическая выраженность вершинных кратеров и микроформ на склонах пингоподобных поднятий указывают на активную современную динамику флюидогенного рельефа.

Ключевые слова: флюидогенный рельеф; дегазация; сейсмоакустика; многолетняя мерзлота

#### STAGES OF DEVELOPMENT OF FLUIDOGENIC LANDFORMS ON THE SHELF OF THE PECHORA SEA

E.A. Eremenko<sup>1,2</sup>, A.V. Kokhan<sup>1</sup>, E.A. Moroz<sup>1</sup>, A.P. Denisova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Abstract.** According to the results of multi-beam echo sounding and high-frequency seismic profiling, carried out as part of the voyages of the research vessel Akademik Nikolai Strakhov in 2018-2019. the stages of development of the fluidogenic relief at the bottom of the northern part of the Pechora Sea were revealed. It has been established that under the conditions of the presence of degrading permafrost, degassing leads to the sequential formation of heaving ramparts, ditches and ping-like forms of various sizes on the bottom surface. Repeatedly recorded acoustic anomalies in the water column in the areas of distribution of ping-like forms associated with the rise and dispersion of fluids, as well as a good morphological expression of apical craters and slope microforms on the slopes of ping-like uplifts, indicate the active modern dynamics of the fluidogenic relief.

Keywords: fluidogenic relief; degassing; seismoacoustics; permafrost

Пингоподобные формы ("pingo-like features", далее – ППФ) относятся к генетическому типу флюидогенных форм и образуются на поверхности шельфа в результате дегазации – процесса поднятия флюидов (в основном метана) из недр Земли вверх по разрезу к поверхности дна и в водную толщу [1]. Впервые ППФ были описаны на шельфе моря Бофорта в 1969 г. [2]. К настоящему моменту эти формы обнаружены и на шельфах Российской Арктики, в частности Баренцевоморском и Карском [3–8], где они представляют собой относительно изометричные поднятия дна высотой от 3-4 до 20-25 м, в поперечнике – от 80-100 до 300-400 м. Несмотря на достаточно широкое распространение ППФ на арктических шельфах, общепринятого мнения о механизме образования этих форм до сих пор нет. Среди основных гипотез происхождения ППФ, фигурирующих в опубликованной научной литературе, можно отметить следующие: 1) пучение (выдавливание) пластично-мерзлых грунтов из-за избыточного давления в ходе таяния межмерзлотных и подмерзлотных газогидратов [9]; 2) охлаждение, замерзание и пучение грунтов при дегазации глубинных углеводородов по зонам повышенной трещиноватости (эффект Джоуля-Томпсона или дроссельный эффект по [10]); 3) выпучивание пластичных льдистых отложений на поверхность в результате формирования зон аномально высокого пластового давления в талых песчаных коллекторах под мерзлой глинистой покрышкой (ключевую роль здесь играет таяние ММП снизу) [3]; 4) замерзание пресных вод при контакте с придонными водами с отрицательной температурой, увеличение объема грунта и последующее пучение (пресные воды мигрируют вдоль подошвы ММП и поднимаются к поверхности на участках выклинивания или сокращения мощности толщи ММП) [6, 8]; 5) формирование ППФ в результате грязевого вулканизма в неотектонически активных зонах [11].

Результаты исследований морфологии и внутреннего строения ППФ [3, 5, 7, 8] позволяют заключить, что морфология ППФ и их современная динамика определяются комплексом условий и факторов развития шельфовой зоны. Так, области распространения ППФ на Баренцевоморском и Карском шельфах приурочены к ареалам многолетнемерзлых пород и районам проявления дегазации как в водной толще, так и в рыхлых осадках, слагающих дно [5].

В ходе экспедиционных работ в рамках 38-го (2018 г.) и 41-го (2019 г.) рейсов НИС «Академик Николай Страхов» в рамках программы «Геолого-геофизические, геоморфологические и гидрофизические исследования в Баренцевом и Карском морях» (руководитель проекта – д.г.н. С.Л. Никифоров) в северной части шельфа Печорского моря были выполнены батиметрическая съемка и высокочастотное акустическое профилирование (рис. 1). Результаты сопряженного анализа полученных геофизических данных позволяют проследить эволюцию флюидогенных форм на дне, на финальной стадии которой образуются ППФ. Для сбора данных применялся программно-аппаратный комплекс, включающий многолучевой эхолот SeaBat 8111 с частотой сигнала 100 кГц; GPS, сенсоры движения и гирокомпас, объединенные в приборе Applanix POS-MV; датчик скорости звука SVP-70; высокочастотный профилограф (EdgeTech3300/Parasound P70). Съемка выполнялась по сетке галсов, отстоящих друг от друга на 200 м, в ходе ее одновременно собирались данных многолучевого эхолота и высокочастотного профилографа. Камеральная обработка данных многолучевого эхолотирования выполнялась в программном пакете PDS2000 (построены цифровые модели рельефа дна с разрешением 2×2 м).

Рельеф дна обследованного полигона представляет собой пологоволнистую абразионно-аккумулятивную равнину на глубинах от 47 до 82 м. С поверхности залегают морские голоценовые и/или поздненеоплейстоценовые (сартанские) суглинки (mQ<sub>3</sub><sup>4</sup>-Q<sub>4</sub>) мощностью от 1–2 до 15–25 м [5]. Они перекрывают аллювиально-морские поздненеоплейстоценовые (сартанские) пески и суглинки (amQ<sub>3</sub><sup>4</sup>) мощностью от 5–10 до 20–25 м, подстилаемые мерзлыми поздненеоплейстоценовыми (казанцевскими) глинами и суглинками (mQ<sub>3</sub><sup>1-3</sup>) или газонасыщенными зырянскими песками (aQ<sub>3</sub><sup>4</sup>) [3, 5].

В мезорельефе дна на обследованном полигоне можно выделить следующие типы флюидогенных форм: пингоподобные поднятия разной морфологии, валы «пучения» дна и рвы, приуроченные к гребням валов (рис. 2, *a*, *б*). На основе результатов морфометрического анализа ППФ



Рис. 1. Местоположение обследованного полигона (рельеф дна приведен по данным [12]).

в обследованной части дна Печорского моря установлено наличие трех морфологических типов [5]. ППФ первого типа (рис. 2, тип 1) – это наиболее крупные формы с диаметром от 100 до 250 м, высотой от 12–15 до 20–25 м, крутизна их склонов составляет от 10–15 до 25–35°, очертания в плане – округлые, иногда эти формы окружены компенсационными понижениями глубиной до 3–4 м. ППФ второго типа (рис. 2, тип 2) – это менее крупные формы диаметром от 35–50 до 120–170 м, высотой от 5–7 до 10–12 м, крутизна их склонов – до 10–15°. Самыми мелкими являются ППФ третьего типа (рис. 2, тип 3): их высота- 5-7 м, в поперечнике – 100–120 м, крутизна склонов – до 10–15°. В некоторых случаях соседние ППФ сливаются в единое грядообразное поднятие, основание которого достигает 700-800 м в длину, высота поднятий (вместе с основанием) может достигать 50-70 м. Нередко грядообразные поднятия ориентированы субширотно или субмеридионально. Отдельной разновидностью флюидогенных форм являются протяженные (до 500–700 м) валы, высотой до 6-10 м над поверхностью дна, шириной 200-400 м, чаще всего вытянутые субмеридионально. Крутизна их склонов составляет не более 8–10°. На округлых гребнях валов местами прослеживаются рвы глубиной до 2 м с довольно резкими очертаниями. На цифровой модели (рис. 2, а) заметно, что ППФ (особенно мелкие) зачастую насажены на гребни валов непосредственно там, где проходят описанные выше рвы. Отметим, что на обследованном участке дна районы наибольшего распространения (плотности) ППФ (а также акустических аномалий в водной толще, связанных с дегазацией) коррелируют с разломами и контурами нефтегазоносной структуры Рейнекской, установленными в работе [13].

Результаты высокочастотного профилирования с использованием профилографа Parasound P70 демонстрируют внутреннее строение ППФ и валов «пучения» и позволяют выявить несколько стадий в развитии флюидогенного рельефа дна на обследованном полигоне. Так, на профиле 1 (рис. 2, *в*) заметно, что с поверхности вала наблюдается маломощная (до 2 м) толща талых грунтов (вероятно, голоценовые морские осадки), а ниже залегает акустически непроницаемая частично или полностью мерзлая (по данным бурения [3]) толща. В центральной части вала прослеживается неглубокий ров, причем на профиле 1 заметно, что слагающие ров отложения в этой области акустически проницаемы (вероятно, частично оттаявшие). В западной части профиль 2 (рис. 2, *г*) пересекает вал «пучения», в центральной части которого также наблюдается ров, причем гораздо более выраженный. Границы сейсмостратиграфических комплексов (голоценовых морских осад-ков и позднеплейстоценовых акустически слоистых аллювиально-морских толщ), фиксируемых под поверхностью данного вала, изогнуты, а акустическим фундаментом являются, по-видимому, мерзлые породы, кровля которых повторяет в целом очертания вала. Подобная картина наблюдается и в восточной части профиля 2 (рис. 2, *г*). В центральной части профиль 2 пересекает ППФ первого типа. Слагающие его породы обладают невысокой акустической проницаемостью, особенно в нижней части формы. Обращает на себя внимание ромбообразное строение «тела» ППФ в профиле (рис. 2, *г*) – в разрезе фиксируется достаточно узкий разрыв вмещающих пород, несколько расширяющийся к поверхности дна. На контакте с породами, слагающими ППФ, границы вмещающих отложений изогнуты, смяты в пологие складки. Акустическая картина внутреннего строения ППФ не позволяет с уверенностью судить о составе и состоянии слагающих ее отложений. Частичная акустическая проницаемость может быть связана как с высокой газонасыщенностью, так и с присутствием ледогрунтов (т. е. лишь частично талым состоянием пород). В пользу того, что ППФ первого типа (крупные) сложены в том числе и талыми газонасыщенными породами, свидетельствует наличие над ними и валами «пучения» акустических аномалий «факельного» типа в воде (рис. 2, *г*).

Анализируя установленные закономерности в изменении морфологии ППФ и их внутреннем строении, можно заключить, что процесс дегазации в условиях наличия многолетней мерзлоты в обследованной части Печорского моря [14] сопровождается формированием флюидогенных форм, облик которых последовательно изменяется. На ранних стадиях под действием давления флюидов на подошву деградирующей мерзлоты происходит образование вала «пучения», в ядре которого установлено [3] наличие льдистых пород. Местами заметная ортогональность и линейность в расположении валов, вероятно, указывают на то, что в субаэральных условиях позднего неоплейстоцена на данном участке могли существовать полигонально-жильные криогенные структуры.



Рис. 2. Рельеф дна и внутреннее строение флюидогенного рельефа.

(*a*) – фрагмент цифровой модели рельефа дна; (*б*) – схема видов флюидогенных форм; (*в*, *г*) – профили, полученные методом высокочастотного сейсмопрофилирования (положение профилей показано на фрагменте (*a*)).

По мере постепенного роста высоты вала происходит его растрескивание в вершинной части и образуется ров. На участках, где мощность и сплошность мерзлых грунтов снижаются (либо наблюдается мощный флюидопоток), непосредственно на рве начинается формирование небольших ППФ в результате перемещения тонких частиц, поднимающихся к поверхности флюидами. Прорыв флюидов к поверхности приводит к частичному снижению давления близ подошвы мерзлоты, и вал, по-видимому, постепенно опускается, в то время как осложняющие его ППФ растут. Так, в западной части обследованного полигона, где в рельефе дна обнаружено более 20 ППФ первого типа, валы практически не выражены.

На обследованном участке дна Печорского моря акустические аномалии в водной толще (факельного типа, а также несфокусированные участки повышенной акустической мутности) фиксировались в ходе 38-го (2018 г.) и 41-го (2019 г.) рейсов НИС «Академик Николай Страхов», что указывает на продолжающуюся дегазацию. Наличие кратеровидных воронок на вершинах ППФ и хорошо выраженных оплывин на их склонах свидетельствует об очень высокой современной активности процессов флюидогенного морфолитогенеза.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-77-10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения»).

1. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. Cambridge University Press. 2007. 492 p.

2. Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingos in the Beaufort Sea // Science. 1971. Vol. 174. Iss. 4011 P. 816–818. DOI:10.1017/CB09780511535918.

3. Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 587–598.

4. Миронюк С.Г., Колюбакин А.А., Голенок О.А., Росляков А.Г., Терехина Я.Е., Токарев М.Ю. Грязевулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение // Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии (18–22 ноября, 2019 г., Москва). М.: ИО РАН. 2019. Т. 5. С. 192–196.

5. Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П., Ананьев Р.А., Сухих Е.А., Никифоров С.Л., Соколов С.Ю. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфах Печорского и Карского морей // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2023. № 3 (в печати).

6. Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K., Caress D.W., Lundsten E., Gwiazda R., Anderson K., Clarke J.H., Youngblut S., Melling H. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost // PNAS. 2022. Vol. 119. Iss. 12. e2119105119. DOI:10.1073/pnas.2119105119.

7. Portnov A., Smith A.J., Mienert J., Cherkashov G., Rekant P., Semenov P., Serov P., Vanshtein B. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. Iss. 15. P. 3962–3967. DOI:10.1002/grl.50735.

8. Serov P., Portnov A., Mienert J., Semenov P., Ilatovskaya P. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2015. Vol. 120. Iss. 8. P. 1515–1529. DOI:10.1002/2015JF003467.

9. Paull C.K., Lii W.U., Dallimore S.R., Blasco S.M., Lorenson T.D., Melling H., Medioli B.E., Nixon F.M., McLaughlin F.A. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. Iss. 1. L01603. DOI: 10.1029/2006GL027977.

10. Мельников В.П., Федоров К.М., Вольф А.А., Спесивцев В.И. Анализ возможного сценария образования придонных ледяных бугров на шельфе Печорского моря // Криосфера Земли. 1998. Т. 2. № 4. С. 51–57. 11. Крапивнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. №2. С. 73–89.

12. Weatherall P., Marks K.M., Jakobsson M., Schmitt T., Tani Sh., Arndt J.E., Rovere M., Chayes D., Ferrini V., Wigley R. A new digital bathymetric model of the world's oceans // Earth and Space Science. 2015. Vol. 2. Iss. 8. P. 331–345. DOI:10.1002/2015EA000107.

13. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000 (второе поколение). Западно-Сибирская серия. Лист R-38-40 (о. Колгуев). Карта полезных ископаемых и прогноза нефтегазоносности / Ред. В.Г. Лопатин. СПб.: ВСЕГЕИ, 2003.

14. Overduin P.P., Schneider von Deimling T., Miesner F., Grigoriev M.N., Ruppel C., Vasiliev A., Lantuit H., Juhls B., Westermann S. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124. Iss. 6. P. 3490–3507. DOI:10.1029/2018JC014675.

#### ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПОЧВЕННОЙ И ОВРАЖНОЙ ЭРОЗИИ В ЗОНАХ ИНТЕНСИВНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ РОССИИ

О.П. Ермолаев, С.С. Мухарамова, К.А. Мальцев, Р.А. Медведева, А.А. Савельев

Институт экологии и природопользования, Казанский федеральный университет, г. Казань, Poccuя, oyermol@gmail.com

Аннотация. В докладе рассматриваются результаты оценки скорости эрозии почвы и овражной эрозии в зонах интенсивного освоения на европейской территории России (ETP). Оценка интенсивности эрозии почв проведена на основе современных оценок эрозионного потенциала осадков (ЭПО) и рельефа (ЭПР), почвозащитной роли растительности и запасов воды в снеге на юге лесной, в лесостепной и степной зонах. Оценка современной овражности осуществлена на базе геоинформационного картографирования космических снимков высокого разрешения в крупном регионе Среднего Поволжья. По интервалам показателя густоты оврагов выделены районы развития овражной эрозии. Определены географические центры локализации оврагов в регионе интенсивного земледелия России.

Ключевые слова: эрозия почв; овражная эрозия; картографирование

#### ASSESMENT OF THE RATE OF SOIL AND GULLY EROSION IN THE ZONES OF INTENSIVE AGRICULTURE IN RUSSIA

O.P. Yermolaev, S.S. Mukharamova, K.A. Maltsev, R.A. Medvedeva, A.A. Savelyev

Institute of Ecology and Environment, Kazan Federal University, Kazan, Russia

**Abstract.** The report examines the results of assessing the intensity of soil erosion and gully erosion in areas of intensive development in the European territory of Russia (ETR). The assessment of the intensity of soil erosion was carried out on the basis of modern estimates of the erosion potential of precipitation (EPO) and relief (EPR), the soil-protective role of vegetation and water reserves in snow in the south of the forest in the forest-steppe and steppe zones. The assessment of the modern gully erosion was carried out on the basis of geoinformation mapping of high-resolution satellite images in a large region of the Middle Volga region. According to the intervals of the indicator of the gully density, areas of development of gully