

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551.510+556.5

*С.Н. Курпотин, Ю.М. Полищук, Н.А. Брыксина***ДИНАМИКА ПЛОЩАДЕЙ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЕР  
В СПЛОШНОЙ И ПРЕРЫВИСТОЙ КРИОЛИТОЗОНАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ  
В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ**

Рассмотрены вопросы применения данных дистанционного зондирования в задачах мониторинга состояния многолетнемерзлых грунтов Западной Сибири в контексте климатических изменений. В качестве геокриологических индикаторов динамики состояния мерзлотных ландшафтов использованы термокарстовые озера. Сформированная коллекция разновременных космических снимков (1973–2005 гг.) территорий в сплошной и островной зонах многолетней мерзлоты позволила исследовать динамику изменений состояния многолетнемерзлых пород в условиях глобального потепления последних десятилетий. Установлено, что суммарная площадь озер в зоне сплошной вечной мерзлоты увеличивается, а в зоне прерывистой вечной мерзлоты, наоборот, уменьшается.

Многолетнемерзлые горные породы широко распространены на Земле и встречаются почти на всех континентах. Площадь их распространения превышает четвертую часть всей суши земного шара, включая примерно 75% территории Аляски и более половины территории Канады и России [1]. В России общая площадь районов распространения вечной мерзлоты равна 10,7 млн км<sup>2</sup>, что составляет около 63,5% от всей территории страны. В зависимости от степени сомкнутости многолетнемерзлых пород согласно [2] различают области их сплошного, прерывистого и островного распространения. На территории России наибольшую площадь (61,8% от общей площади распространения вечной мерзлоты) занимает область криолитозоны сплошного типа, границы которой охватывают большую часть арктических островов и тянутся непрерывно вдоль всего побережья от Карского моря на западе до Чукотского моря на востоке, проникая в глубь континента в Цен-

тральной Сибири и Якутии [3]. Криолитозона островного типа, занимая 21,2% от общей площади распространения вечной мерзлоты на территории России, простирается от Кольского полуострова до побережья Японского моря, Сахалина и Камчатки. А наименьшую площадь (17% от общей площади вечной мерзлоты) имеет область криолитозоны прерывистого типа, расположенная между областями островного и сплошного типов криолитозон.

Установлено, что глобальное потепление климата будет наиболее остро проявляться в высоких (северных) широтах. Более того, именно субарктические ландшафты являются наиболее чувствительными к температурным изменениям в силу их пограничного положения в пределах криолитозоны [4]. При этом западно- и среднесибирская субарктика теплеют значительно быстрее, чем другие регионы мира: за последнее столетие среднегодовая температура здесь повысилась более чем на 3, а в зимнее время – на 4 градуса [5].

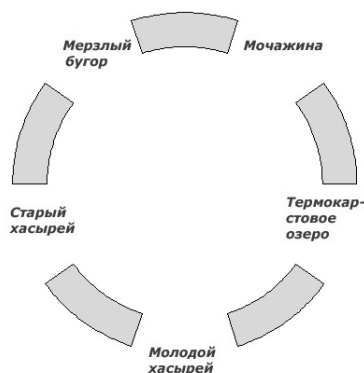


Рис. 1. Схема циклической сукцессии развития плоскобугристых болот

Бугристые болота субарктики Западной Сибири являются замечательным природным индикатором климатических изменений. Сегодня в этом регионе в силу более резкого потепления климата, обусловленного высокой степенью его континентальности, происходят процессы, с которыми скандинавские страны, Канада и Аляска столкнутся только через несколько лет, и в этом смысле Западная Сибирь является уникальным природным полигоном.

До недавнего времени ландшафт мерзлых бугристых болот находился в достаточно стабильном состоянии. Наблюдалась своеобразная «пульсация» поверхности, обусловленная взаимными переходами элементов ландшафта. Общую стратегию этого цикла превращений можно выразить в виде следующей схемы: мерзлый бугор мог растаять и через серию мочажин возрастающей обводненности превратиться в термо-

карстовое озеро; озеро, сбросив свои воды в другой водоем, могло превратиться в спущенное озеро – хасырей; в днище опорожненной озерной котловины обычно начиналось мерзлотное пучение, приводящее к восстановлению мерзлых бугров [6] (рис. 1).

Таким образом, в западно-сибирской субарктике длительное время наблюдался достаточно устойчивый баланс криогенных процессов: термического карста и мерзлотного пучения. Однако в последние годы произошло нарушение существовавшего ранее баланса между ними, что привело к сбою цикла. Сегодня термокарст заметно доминирует, и деградация мерзлоты уже охватила значительные площади бугристых болот. Есть все основания говорить о том, что описанная нами циклическая сукцессия приобрела линейный характер, направленный в сторону усиления термокарста [6].

Во время полевых исследований 2005 г. была обнаружена парадоксальная ситуация: в южной области распространения плоскобугристых болот термокарст значительно менее активен, чем в северных (в районе полярного круга  $N\ 65,5-66^\circ\ E\ 074-075,5^\circ$ ). Это объясняется тем, что мерзлый торф играет роль теплоизоляционного экрана, и его мощный слой предохраняет нижележащие подстилающие породы от таяния, поэтому на мелкозалежных плоскобугристых болотах приполярья (мощность торфа менее 0,5 м), несмотря на более суровый климат, термокарст выражен значительно сильнее, чем в южной области их распространения, где мощность торфяной залежи составляет в среднем 1–1,5 (2) м. Выявленная нами закономерность вполне объяснима и определяется постепенным убыванием мощности торфяной залежи бугристых болот с юга на север вследствие уменьшения годовичного прироста мхов в этом направлении.

Одной из важных задач современных исследований северных территорий Евразии является выявление особенностей влияния глобального потепления на состояние многолетнемерзлых пород (ММП). Важность этой задачи определяется тем, что большинство газовых ме-

сторождений и большое число месторождений нефти России располагается в зоне вечной мерзлоты Западной Сибири, и снижение прочности ММП под воздействием потепления климата приводит к росту аварийности на трубопроводах и других сооружениях нефтегазового комплекса [8, 9], вызывая рост экономических и экологических ущербов. В связи с этим изучение изменений криогенного состояния мерзлотных ландшафтов под воздействием глобального потепления климата, несомненно, является актуальной проблемой, решение которой ввиду труднодоступности территории Западной Сибири из-за высокой степени ее заболоченности невозможно без применения данных дистанционного зондирования поверхности Земли [11–13]. Поэтому целью работы явилось изучение динамики современного криогенного состояния мерзлотных ландшафтов Западной Сибири в зоне прерывистого распространения многолетней мерзлоты по космическим снимкам. Проведенный анализ литературных источников по использованию данных дистанционного зондирования в геокриологических исследованиях показал [11, 12], что термокарстовые озёра, образующиеся в результате вытаивания подземных льдов различного генезиса, хорошо дешифрируются на космических изображениях и являются наиболее пригодными геоморфологическими индикаторами криогенных изменений поверхности в условиях потепления.

Для изучения динамики термокарстовых озер на исследуемой территории были выбраны 11 тестовых участков (ТУ), расположенных в разных зонах вечной мерзлоты и в различных геоботанических подзонах. На рис. 1 показана карта-схема геокриологического зонирования северной части Западной Сибири, построенная на основе данных [3, 14, 15], с обозначенными номерами тестовых участков. Согласно рис. 2, тестовые участки с номерами 1–6 выбраны в зоне прерывистого распространения вечной мерзлоты. Тестовые участки с номерами 7–11 располагаются в зоне сплошной вечной мерзлоты.

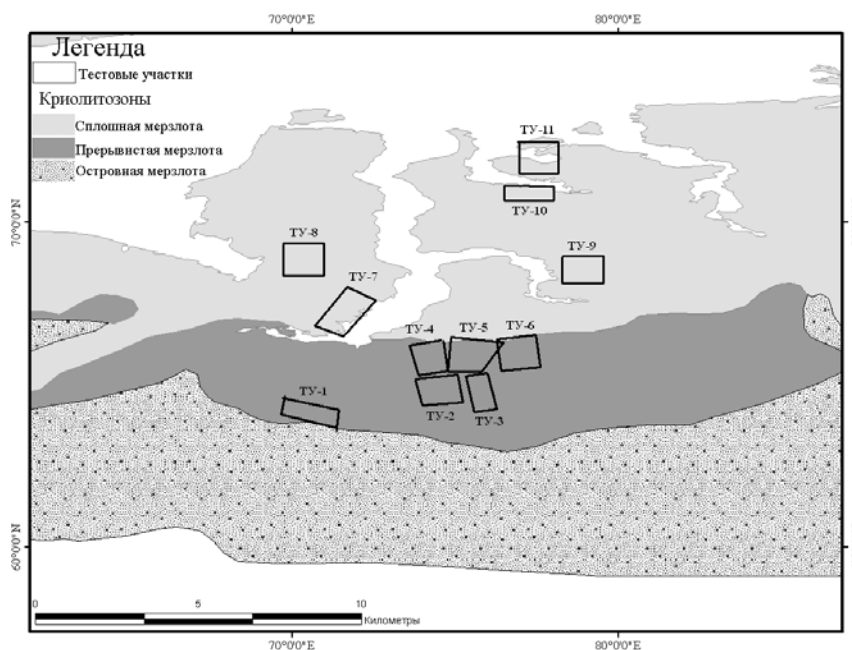


Рис. 2. Карта-схема расположения зон вечной мерзлоты на территории Западной Сибири

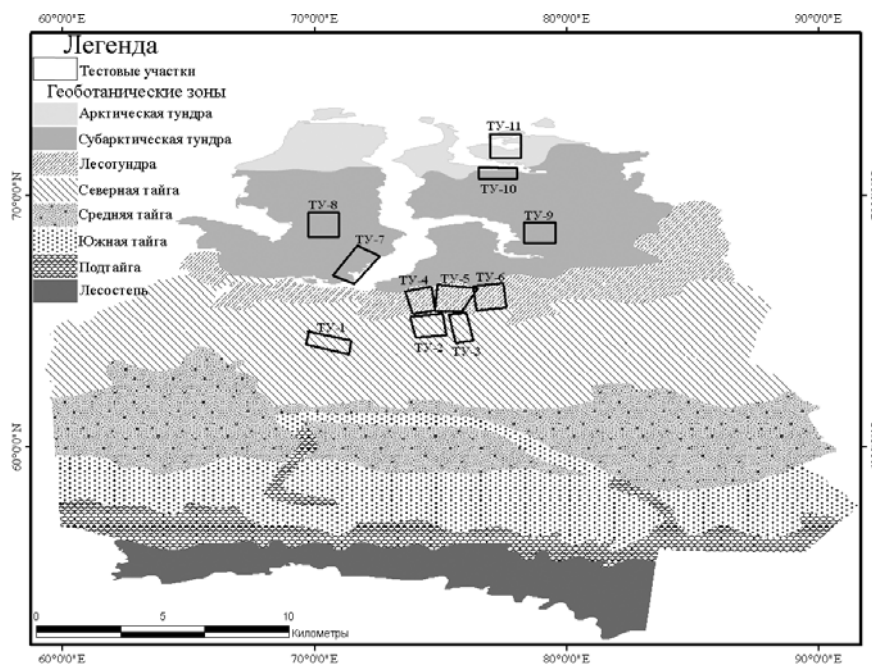


Рис. 3. Карта-схема геоботанического районирования территории Западной Сибири

Как видно из рис. 3, в подзоне арктической тундры располагается один тестовый участок (ТУ-11), в подзоне субарктической тундры – четыре тестовых участка с номерами 7–10. В остальных двух геоботанических подзонах было выбрано по три тестовых участка: ТУ под номерами с 1 по 3 располагаются в подзоне северной тайги, а участки с номерами 4, 5 и 6 – в подзоне лесотундры.

В качестве объектов геофизиологического исследования были использованы термокарстовые озера и хасыреи, хорошо дешифрируемые на космических сним-

ках и являющиеся наиболее пригодными геоморфологическими индикаторами климатических изменений. На рис. 4 приведены изображения термокарстовых озер и хасыреев (котловины спущенных озер). Термокарстовые озера, образующиеся в результате вытаивания подземных льдов различного генезиса, как правило, имеют характерную округлую, овально-удлиненную или лопастную форму. Хасыреи представляют собой заторфованные котловины спущенных термокарстовых озер с сочетанием травяно-сфагново-кустарничковых болот, мелких озерков и формирующихся бугров пучения.

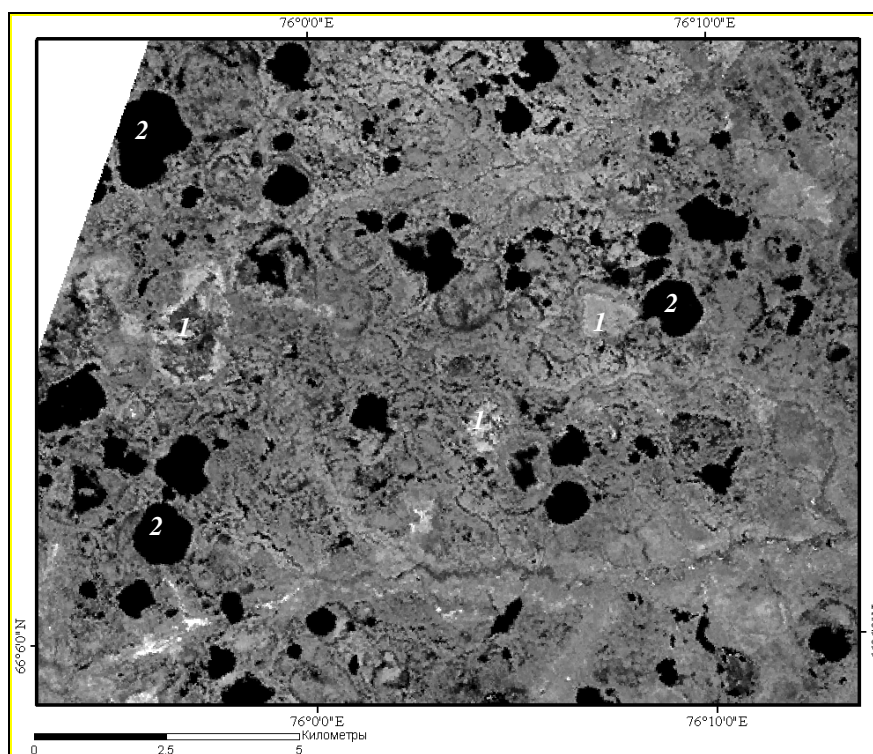


Рис. 4. Фрагмент космического снимка Meteor-3М (15.07.2005 г.) территории ТУ-6: 1 – хасыреи; 2 – термокарстовые озера

Для исследования динамики термокарстовых озер на каждый тестовый участок подбирались разновременные космические снимки с 1973 по 2006 г. В период с 1973 по 2001 г. были использованы космические снимки Landsat-1, 4, 5, 7, а с 2005 по 2006 г. – космические снимки Метеор-3М и радарные снимки ERS-2. На каждом ТУ были выбраны по 40 наиболее крупных (более 20 га) термокарстовых озер, площади которых измерялись с помощью программных средств ERDAS IMAGINE 9.1. По результатам измерений площадей на каждом тестовом участке были рассчитаны: суммарные площади термокарстовых озер, абсолютные и относительные величины изменений суммарной площади озер за период исследования. Величина относительного изменения площадей рассчитывалась путем деления величины абсолютного изменения на суммарную площадь озер, определенную по снимкам начального года исследования.

В последние годы в сибирской Арктике заметно активизировался спуск термокарстовых озер [13]. С одной стороны, это закономерная стадия описанной нами выше циклической сукцессии эндогенного развития плоскобугристого болотного комплекса. Многие озера Западной Сибири на протяжении тысячелетий естественным образом превращались в хасыреи (спущенные озера), сбрасывая свои воды в другие водоемы и водотоки. Однако все дело здесь в нормах и тенденциях:

пространственная мозаика ландшафтов со спущенными озерами убедительно показывает, что их исчезновение связано с таянием мерзлоты.

Американские ученые, проанализировав космические снимки на площади 515 000 км<sup>2</sup> в Арктике и субарктике Западной Сибири для более чем 10 000 крупных озер, установили, что за период с начала 1970-х до конца 1990-х гг. количество крупных озер (площадью более 40 га) сократилось с 10 882 до 9 712, при этом 125 крупных озер исчезли полностью. В то же время в области сплошной вечной мерзлоты общая площадь озер увеличилась на 13 300 га (+12%) за счет увеличения количества новых озер: их число возросло с 1 148 в 1973 г. до 1 197 в 1997–1998 гг., т.е. увеличилось на 4%. При этом устойчивый тренд роста озер в зоне сплошной вечной мерзлоты резко контрастирует с заметным уменьшением их количества в более южных зонах спорадического и островного характера ее залегания [13]. Это полностью совпадает с выявленной нами и описанной ранее закономерностью степени выраженности термокарста для северной и южной областей распространения мерзлых бугристых болот и объясняется теплоизоляционной ролью торфяных залежей, мощность которых закономерно уменьшается с юга на север.

В табл. 1 и 2 приведены результаты статистической обработки данных об изменении площадей термокарстовых озер, полученных по спутниковым измерениям.

Таблица 1

Изменение суммарной площади термокарстовых озер в прерывистой криолитозоне, га

Тестовые участки		ТУ-1	ТУ-2	ТУ-3	ТУ-4	ТУ-5	ТУ-6
Общая площадь озёр, га	1973	2155,1	<b>3673,2</b>			3165,7	3864,2
	1984						
	1988	1902,2	2664,1	3777,0			
	2001		3427,5	2561,1	2887,1	2652,4	
	2005	1685,5	3234,8	2644,7	2921,7	2892,4	2759,6
Изменение суммарной площади озёр, га		-469,6	-438,4	-19,4	-855,3	-273,3	-1104,6
Относительное изменение суммарной площади озёр, %		-22	-12	-1	-23	-9	-29

Таблица 2

Изменение суммарной площади термокарстовых озер в сплошной криолитозоне, га

Тестовые участки		ТУ-7	ТУ-8	ТУ-9	ТУ-10	ТУ-11
Общая площадь озёр, га	1973	2374,5	1899,1	3566,9	3421,2	3463,5
	1984					
	1988	2651,3				3711,0
	2001		3979,1	3739,1	3641,3	
	2006	2621,2	2035,0	3998,9	3765,3	3761,0
Изменение суммарной площади озёр, га		246,7	135,9	432,0	344,1	297,3
Относительное изменение суммарной площади озёр, %		10	7	12	10	9

На рис. 5 представлен график зависимости величины относительных изменений суммарной площади термокарстовых озер (R) от географической широты расположения тестовых участков, построенный на основе данных табл. 1 и 2.

Как видно из рис. 5, на широтах выше 67° с.ш. (зона сплошной вечной мерзлоты) наблюдается увеличение площадей термокарстовых озер. На широтах 66° с.ш. и ниже (зона прерывистой вечной мерзлоты) площади

термокарстовых озер значительно сокращаются. Сравнение рис. 2 и 5 показывает, что изменение характера геокриологических процессов (переход от сокращения площадей озер к их росту) наблюдается в интервале широт 66–67° с.ш., приблизительно совпадающем с границей зон сплошного и прерывистого типов распространения многолетнемерзлых пород.

Итак, проведен анализ полученных данных в зависимости от ландшафтно-геоботанической характери-

стики тестовых участков. Установлено, что наибольшее сокращение (в интервале 9–0%) суммарной площади термокарстовых озер наблюдается на тестовых участках, располагающихся в ландшафтно-геоботанической подзоне лесотундры. В подзоне северной тайги относительная величина сокращения площади озер

значительно меньше и изменяется от 1 до 22% на разных тестовых участках. В подзонах субарктической и арктической тундры, где площади озер возрастают (относительное изменение 7–12%), каких-либо особенностей в зависимости от ландшафтно-геоботанической характеристики тестовых участков не обнаруживается.

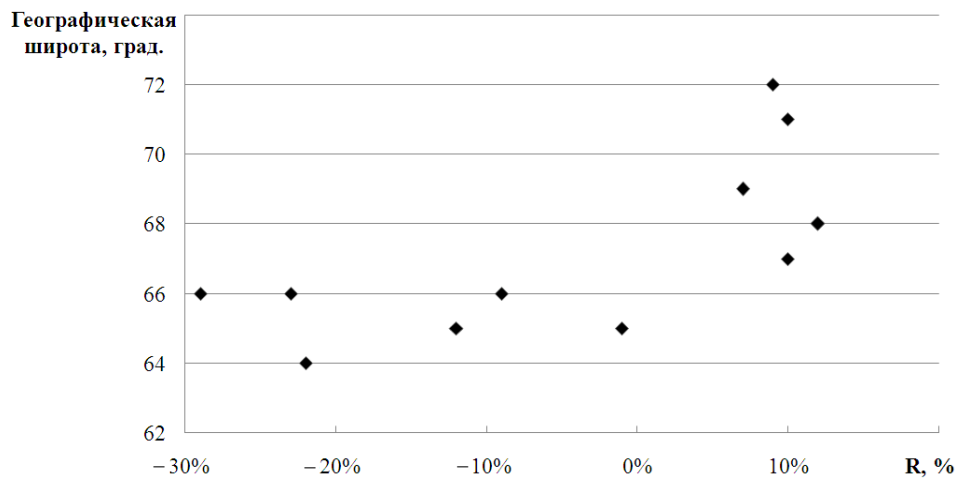


Рис. 5. Относительные значения термокарстовых озер в зависимости от широты

Показано, что протекающие в криолитозоне термокарстовые процессы имеют широтную специфику: озера в зоне сплошной вечной мерзлоты увеличивают свои площади, а в зоне прерывистой вечной мерзлоты, наоборот, сокращают их. Это связано с убыванием мощности торфяной залежи бугристых болот при дви-

жении с юга на север, что существенно уменьшает возможность спуска термокарстовых озер в северной области их распространения, поскольку линейные мочажины, работающие в дальнейшем и как каналы спуска, успешно выполняют дренажную функцию только в условиях достаточно мощной торфяной залежи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Геокриология СССР*. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1988. 358 с.
2. Павлов А.В., Ананьева Г.В. Оценка современных изменений температур воздуха на территории криолитозоны России // *Криосфера Земли*. 2004. Т. 8, № 2. С. 3–9.
3. *Атлас СССР* / Отв. ред. Т.П. Сидоренкова. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1984. 260 с.
4. Callaghan T.V., Jonasson S. 1995. Arctic ecosystems and environmental change. *Phil Trans Roy Soc Lond A*. 352: 259–276.
5. Jones P.D., Moberg A. 2003. Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update // *Journal of Climate*. Vol. 16, № 2. P. 206–223.
6. Кирпотин С.Н. Западная Сибирь – уникальный болотный регион и ее роль в регулировании глобального климата // *Актуальные проблемы экологии и природопользования Сибири в глобальном контексте*: Сб. ст. / Под. ред. С.Н. Кирпотина. Томск: Изд-во НТЛ, 2006. С. 22–42.
7. Полищук Ю.М., Яценко И.Г. Сравнительный анализ химического состава нефтей России на территории вечной мерзлоты и вне ее // *Криосфера Земли*. 2007. Т. 11, № 1. С. 45–51.
8. *Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов* / Под ред. Е.С. Мельникова и С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.
9. Анисимов О., Лавров С. Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ // *Технологии ТЭК*. 2004. № 3. С. 78–83.
10. Samsonov R., Lesnykh V., Polishchuk Yu., Bryksina N. The climate change impact on thermokarst in West-Siberian territory and geological risks in gas industry / *Proc. of 14<sup>th</sup> annual conference of TIEMS. Split: TIEMS, 2007*. P. 212–216.
11. Некрасов И.А., Петропавловская М.С. Опыт применения космических снимков для геокриологического картирования // *Исследования Земли из космоса*. 1983. № 2. С. 14–20.
12. Полищук Ю.М., Токарева О.С. Вопросы мониторинга изменений состояния многолетнемерзлых пород в условиях глобального потепления с использованием космических снимков // *Вестник ЮГУ*. 2006. № 3. С. 87–90.
13. Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes // *Science*. 2005. Vol. 308, № 3. P. 14.
14. Duchkov A.D. Characteristics of Permafrost in Siberia // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. NATO Science Series IV. 2006. Vol. 65. P. 81–92.
15. Melnikov V.P., Drozdov D.S. Distribution of Permafrost in Russia // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. NATO Science Series IV. 2006. Vol. 65. P. 69–80.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 11 апреля 2008 г.