

# Изучение динамики изменений термокарстовых форм рельефа с использованием космических снимков

Н.А. Брыксина<sup>1</sup>, А.В. Евтюшкин<sup>1</sup>, Ю.М. Полищук<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Югорский НИИ информационных технологий, г. Ханты-Мансийск  
628011 г. Ханты-Мансийск, ул. Мира, 151

E-mail: [www.uriit.ru](http://www.uriit.ru), [pna@uriit.ru](mailto:pna@uriit.ru)

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск  
628012 г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16

E-mail: [Yu\\_Polishchuk@ugrasu.ru](mailto:Yu_Polishchuk@ugrasu.ru)

Рассмотрены вопросы применения данных дистанционного зондирования в задачах мониторинга состояния многолетнемерзлых грунтов Западной Сибири. В качестве геокриологических индикаторов изменения состояния поверхности использованы термокарстовые озера и хасыреи. Подготовленная за период 1973-2005 гг. коллекция разновременных космических снимков территории тестового участка, расположенного в южной зоне вечной мерзлоты Западной Сибири, позволила исследовать динамику изменений состояния многолетнемерзлых пород в условиях глобального потепления последних десятилетий.

## Введение

Многолетнемерзлые горные породы широко распространены на Земле и встречаются почти на всех континентах. В России общая площадь районов распространения вечной мерзлоты составляет около 63,5 % территории страны. Основные закономерности распространения многолетнемерзлых пород изложены в работах В.А. Кудрявцева, В.Н. Достовалова, В.Т. Трофимова, И.Д. Данилова, В.В. Баулина, Г.И. Дубикова, А.Р. Курчикова и других исследователей [1-6].

В зависимости от степени сомкнутости многолетнемерзлых пород, согласно [6], 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 почти непрерывно вдоль всего побережья от Карского моря на западе до Чукотского моря на востоке, проникая в глубь континента в центральной Сибири и в Якутии [2]. 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 мерзлоты) имеет область криолитозоны прерывистого типа, расположенная между областями островного и сплошного типов криолитозон.

Перспективы развития нефтегазодобычи в России связываются с освоением северных территорий, что потребует расширения трубопроводной сети и строительства других объектов нефтегазового комплекса на территориях, находящихся в зоне вечной мерзлоты. В связи с начавшимся с 70-х гг. глобальным потеплением и ожидающейся интенсификацией геокриологических процессов в зоне вечной мерзлоты будут усиливаться аварийность на нефте- и газопроводах и других объектах нефтегазового комплекса Западной Сибири, что уже в ближайшей перспективе приведет к росту геозкологических рисков и к значительным экономическим ущербам. В связи с этим изучение изменений криогенного состояния болотных ландшафтов в зоне распространения многолетней мерзлоты на территории Западной Сибири в связи с глобальным потеплением 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.

Как показано в [7-9], в предшествующих исследованиях геокриологических процессов в зоне вечной мерзлоты в качестве данных дистанционного зондирования в основном использовались

аэрофотоснимки, а космические снимки применялись лишь в единичных случаях. Преимущество использования современных космических снимков (КС) высокого разрешения состоит в том, что при сопоставимых с аэрофотосъемкой величинах пространственного разрешения КС обеспечивает значительно больший по площади охват территории. Более того, в последние годы благодаря прогрессу в развитии информационно-космических технологий существенно возросло пространственное разрешение КС, что создает принципиальную возможность изучать изменения криогенного состояния болотных ландшафтов с использованием космических снимков высокого разрешения в условиях влияния климатических изменений. Поэтому целью работы явилось изучение динамики современного криогенного состояния болотных ландшафтов в зоне распространения многолетней мерзлоты в Западной Сибири по космическим снимкам.

### Описание тестового участка

Среди индикаторов криогенных явлений наибольшее значение имеют геоморфологические индикаторы, основными из которых на территории вечной мерзлоты в Западной Сибири являются термокарст, полигональный рельеф, пучение [8, 9]. Анализ литературных данных по дешифрированию аэрофотоснимков в геокриологических исследованиях показал, что в качестве наиболее перспективных индикационных признаков изменения криогенных ландшафтов могут быть использованы термокарстовые озера, хорошо дешифрируемые на космических изображениях [8-10].

Для изучения изменений состояния многолетнемерзлых пород с использованием космических снимков была выбрана территория Средне-Хулымского месторождения, расположенная на юге Ямало-Ненецкого автономного округа, в южной зоне островного распространения многолетнемерзлых пород. Тестовый участок для проведения исследований расположен в междуречье верхних течений рек Левая Хетта и Хугейяха, крупных левых притоков реки Надыма.

Объектом исследования служили термокарстовые озера и хасыреи. На рис. 1 для иллюстрации приведен фрагмент космического снимка Landsat-7, на котором показаны озера и хасыреи. 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.

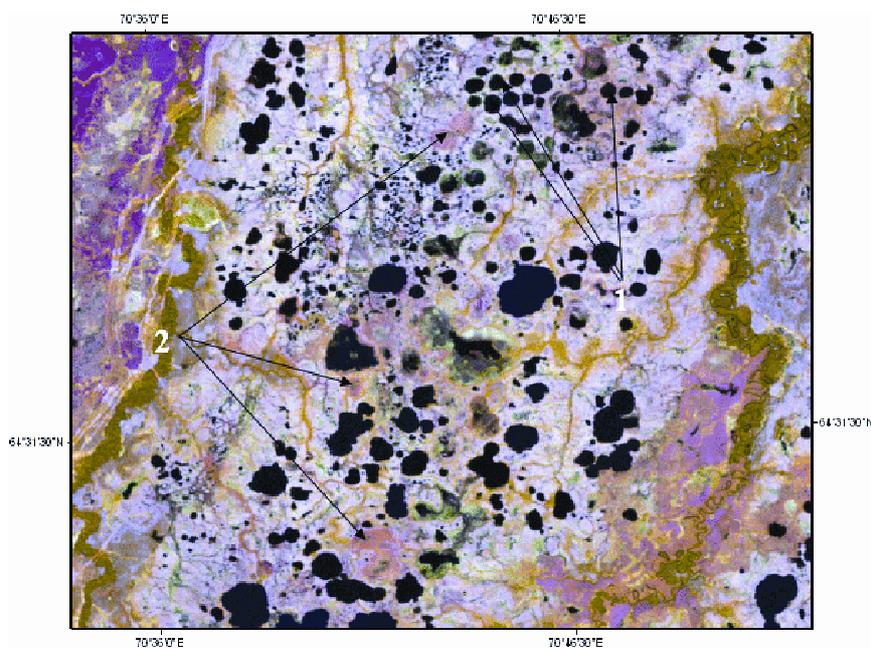


Рис. 1. Фрагмент космического снимка Landsat-7 (03.07.2002 г.) центральной части территории Средне-Хулымского месторождения. Обозначения: 1 – термокарстовые озера; 2 – хасыреи

## Данные и результаты исследований

Для исследования динамики изменения криогенных объектов на указанной территории были использованы пять разновременных космических снимков, полученных со следующих космических аппаратов:

1. Landsat - 1 (сканер MSS), 10.08.1973.
2. Landsat - 5 (сканер MSS), 26.06.1988.
3. Ресурс - Ф2 (камера МК 4), 14.06.1993.
4. Landsat - 7 (сканер ETM), 03.07.2002.
5. Spot - 5 (сканер HRV), 20.07.2005.

На рис. 2, представляющем фрагмент космического снимка 1973 г. территории тестового участка, номерами отмечены 11 термокарстовых озер. Для проведения исследований динамики изменения состояния термокарстовых озер измерялись площади водных поверхностей озер на разновременных космических снимках с помощью программных средств ERDAS Imagine.

Для иллюстрации на рис.3 показаны фрагменты разновременных космических снимков, показывающие последовательные стадии формирования котловины на месте исчезнувшего термокарстового озера 9 (согласно нумерации рис. 2).

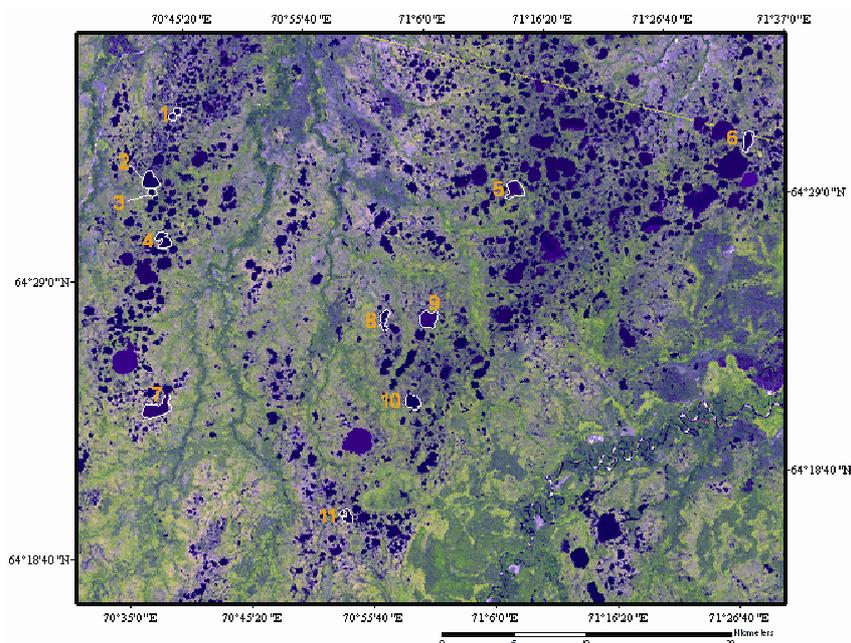


Рис. 2. Фрагмент космического снимка Landsat-1 (10.08.1973г.) с обозначенными термокарстовыми озерами

Измерения площади водной поверхности озера 9 в разные годы показали, что в 1993 г. площадь водной поверхности озера 9 (рис. 3-б) уменьшилась до 60% от исходной величины площади этого озера, измеренной в 1973 г. (рис. 3-а). Процесс сокращения площади озера продолжается до наших дней, что подтверждают снимки 2002 г. и 2005 г. (рис. 3-в и 3-г соответственно). И как видно из последнего снимка, за более чем 30-летний период площадь озера к 2005 г. сократилась до 40% от ее первоначальной величины.

На рис. 4 приведен график зависимости площади ( $S$ ) озера 9 от времени ( $T$ ), где точки обозначают результаты измерения площади озера по космическим снимкам. Как видно из рисунка, зависимость изменения площади озера от времени допускает экспоненциальную аппроксимацию (точность аппроксимации 0,9573).

Анализ динамики изменений площади всех 11 озер, обозначенных на рис 2, показал, что некоторые озера со временем исчезли полностью (спущенные озера) и превратились в хасыреи. Ни-

же приводится пример исчезнувшего озера. На рис. 5 даны фрагменты разновременных космических снимков, показывающие последовательные стадии исчезновения озера 7 и превращения его в хасырей.

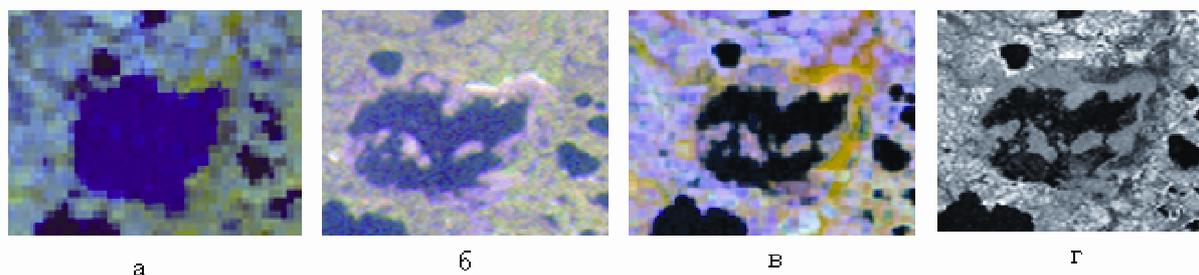


Рис. 3. Фрагменты космических изображений последовательных стадий изменения площади озера 9. Обозначения: а-Landsat -1 (1973 г.), б-Ресурс-Ф2 (1993 г.), в-Landsat-7 (2002 г.), г-Spot-5 (2005 г.)

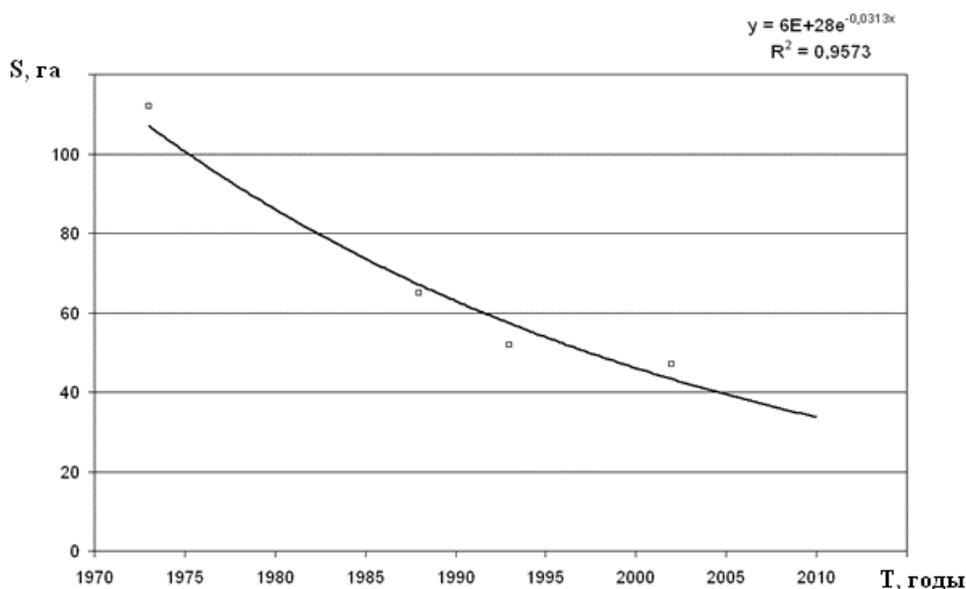


Рис. 4. Динамика изменения площади озера 9

Результаты анализа серии снимков на рис. 5 показали, что площадь озера в 1988 г. сократилась до 18% от первоначальной площади, измеренной в 1973 году. В 1993 году площадь озера сократилась еще до 3%, а уже в 2005 году озеро полностью исчезло. На рис. 5-г можно отчетливо увидеть форму котловины исчезнувшего озера, которая на панхроматическом снимке Spot-5 выделяется более темным цветом. На рис. 6 для иллюстрации приведен график изменения площади озера 7 в зависимости от времени, который, как и в предыдущем случае, допускает экспоненциальную аппроксимацию (с точностью 0,8888).

Аналогичные исследования динамики изменения площади термокарстовых озер на территории Средне-Хулымского месторождения были проведены и для других 9 термокарстовых озер. Результаты измерений площадей всех 11 озер по космическим снимкам приведены на рис. 7 в виде семейства графиков зависимости изменения площадей озер во времени.

На представленном графике (рис.7) номерами 1, 3, 4, 7, 11 отмечены озера, которые исчезли полностью, остальные 6 озер сократили свои площади и находятся в стадии формирования хасыреев. Как следует из приведенных зависимостей, площадь термокарстовых озер на выбранном тестовом участке в последние три десятилетия уменьшается во времени с различной скоростью.

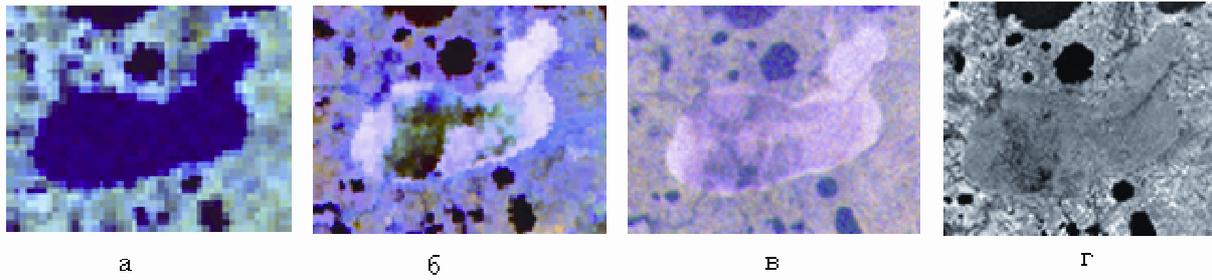


Рис. 5. Фрагменты космических изображений озера 7 с конечной стадией формирования котловины. Обозначения: а-Landsat - 4 (1973 г.), б-Landsat-5 (1988 г.), в-Ресурс-Ф2 (1993 г.), з-Spot-5 (2005 г.)

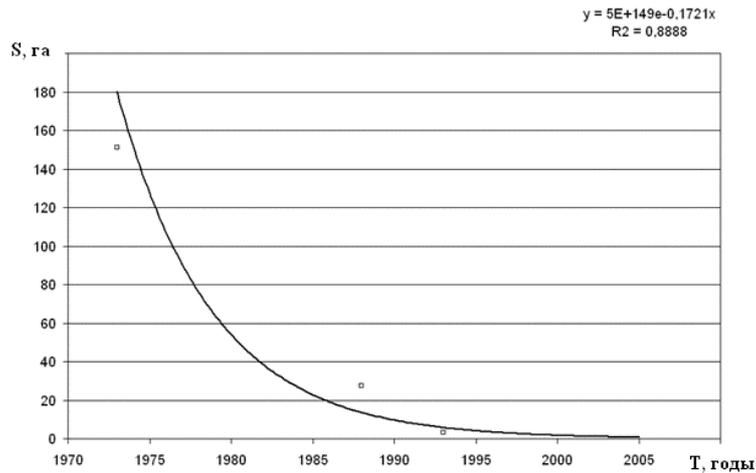


Рис. 6. Динамика изменения площади озера 7 от времени

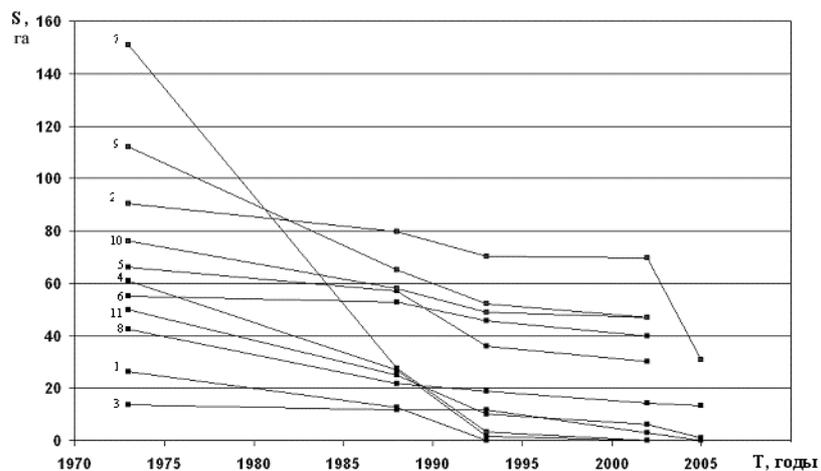


Рис. 7. Изменение площадей 11 термокарстовых озер во времени

### Заключение

Ожидается, что глобальное потепление климата, ставшее, пожалуй, одной из наиболее значимых экологических проблем современности, будет наиболее ощутимо проявляться в высоких широтах. Более того, именно болотные ландшафты в зоне распространения многолетнемерзлых пород являются наиболее чувствительными к температурным изменениям, в силу таяния вечной мерзлоты [11]. При этом северные территории Западной Сибири теплеют значительно быстрее, чем другие регионы мира. Так, за последнее столетие среднегодовая температура по данным [12] здесь повысилась более чем на 3°, а в зимнее время – на 4°.

В настоящей работе на основе применения разновременных космических снимков исследовано изменение во времени площадей 11 термокарстовых озер, выбранных на тестовом участке, который расположен в южной зоне островного распространения многолетней мерзлоты в Западной Сибири. Установлено, что все выбранные для анализа озера сократили площади своих водных поверхностей, а пять из них вообще сбросили воды и превратились в заторфованные котловины – хасыреи, что может служить проявлением усиления криогенных процессов, вызванных глобальным потеплением. Результаты исследования динамики исчезновения термокарстовых озер и формирования плоскодонных котловин - хасыреев на примере рассмотренного выше озера 7 позволяют сделать вывод о стремительной деградации многолетнемерзлых пород под влиянием глобального потепления.

Термокарстовые озера и хасыреи являются наиболее удобным объектом для дистанционного мониторинга воздействия потепления климата на состояние многолетнемерзлых пород и изучения динамики болотных ландшафтов на основе космических снимков разных лет. Этот вывод подтверждается результатами исследований американских ученых, которые на основе анализа космических снимков территории в зоне вечной мерзлоты Западной Сибири установили [13], что за период с начала 70-х до конца 90-х годов на исследованной территории количество крупных озер (площадью более 40 га) сократилось с 10882 до 9712, при этом 125 крупных озер исчезли полностью.

Следовательно, с использованием космических снимков территории тестовом участке выявлены существенные геоморфологические и ландшафтные изменения поверхности, характерные для посткриогенного состояния территории в южной зоне островного распространения многолетней мерзлоты, которые могут использоваться в качестве геокриологических индикаторов влияния глобального потепления на многолетнемерзлые породы при дешифрировании космических снимков.

### Литература

1. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под. ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1988. – 358 с.
2. Атлас СССР / Отв. редактор Т.П. Сидоренкова. – М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1984. – 260 с.
3. *Duchkov A.D.* Characteristics of Permafrost in Siberia // *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. - NATO Science Series IV, 2006. - Vol. 65. – pp. 81 – 92.
4. *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.
5. *Анисимов О., Лавров С.* Глобальное потепление и таяние вечной мерзлоты: оценка рисков для производственных объектов ТЭК РФ // *Технологии ТЭК*, 2004. - № 3. – С. 78 – 83.
6. *Павлов А.В., Ананьева Г.В.* Оценка современных изменений температур воздуха на территории криолитозоны России // *Криосфера Земли*, 2004. – т. 8. - № 2. – С. 3 – 9.
7. *Некрасов И.А., Петропавловская М.С.* Опыт применения космических снимков для геокриологического картирования // *Исследования Земли из космоса*. 1983. - № 2. – С.14-20.
8. *Гудилин И.С., Комаров И.С.* Применение аэрометодов при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. - М.: Недра, 1978. – 319 с.
9. *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.
10. *Мельников Е.С., Вейсман Л.И., Кришук Л.Н.* Ландшафтные индикаторы инженерно-геокриологических условий севера Западной Сибири и их дешифровочные признаки. – М.: Недра, 1974. – 132 с.
11. *Callaghan, T.V., Jonasson, S.* Arctic ecosystems and environmental change // *Phil Trans Roy Soc Lond A*, 1995. – No 352. - pp. 259-276.
12. *Jones P.D. and Moberg A.* Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An Extensive Revision and an Update // *Journal of Climate*, 2003. - Vol. 16. - No 2. - pp. 206-223.
13. *Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D.* Disappearing Arctic Lakes // *Science*, 2005. – V. 308. – No 3. - pp. 14.