

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОЗЕР И ПРОЦЕССОВ НОВООБРАЗОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

С.Г. Корниенко¹, Л.Н. Крицук², К.И. Якубсон¹, Н.В. Ястреба²

1 – Институт проблем нефти и газа РАН, 2 – ВСЕГИНГЕО

e-mail: spaceakm2@ogri.ru

Освоение нефтегазовых месторождений Арктических районов, и в первую очередь на полуострове Ямал, связано с трансформацией природных ландшафтов и изменением температурного режима мерзлых грунтов, состояние которых существенно влияет на безопасность функционирования объектов нефтегазового комплекса. В настоящее время на полуострове Ямал открыто 26 месторождений углеводородов, три из которых (Бованенковское, Тамбейское и Новопортовское) уже разрабатываются; построена первая нитка магистрального газопровода и железная дорога к Бованенковскому нефтегазоконденсатному месторождению (НГКМ). В настоящее время на восточном побережье полуострова в районе п. Сабетта реализуется масштабный проект по освоению Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения, включающий строительство завода по сжижению природного газа и морского порта для его транспортировки в Европу и Азию. Очевидно, что в ближайшее время техногенное воздействие на хрупкую природу Ямала будет существенно возрастать.

Основные геоэкологические риски при освоении полуострова Ямал связаны с широко распространенными здесь подземными льдами, залегающими на разных глубинах, поскольку при нагрузке они теряют свою несущую способность, а их вытаивание приводит к развитию таких быстро протекающих криогенных процессов, как термокарст и термоэрозия. Изменение температурного и влажностного режимов грунтов, особенно с переходом температур отметки 0 °С, приводит к изменению состава, строения и свойств грунтов, их прочности, сжимаемости и несущей способности, что, в свою очередь, приводит к активизации криогенных процессов. Основными причинами деформаций сооружений в криолитозоне являются локальные, неравномерные просадки мерзлых грунтов при оттаивании или пучение водонасыщенных грунтов при их замерзании. Очевидно, что вероятность развития подобных процессов должна учитываться при проектировании и строительстве объектов.

Согласно существующим представлениям, полуостров Ямал расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) со среднегодовой

температурой грунтов от $-2\text{ }^{\circ}\text{C} \div -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на юге полуострова до $-7\text{ }^{\circ}\text{C} \div -9\text{ }^{\circ}\text{C}$ на севере. Однако вследствие широкого распространения на полуострове озер разной морфологии и размеров многолетнемерзлые грунты на полуострове Ямал характеризуются значительной прерывистостью с поверхности и наличием подозерных таликов различной мощности, которая зависит от размеров и глубины озер. Озера чрезвычайно широко распространены на полуострове Ямал, а система их расположения отражает тектоническое строение территории и, прежде всего, наличие дизъюнктивных дислокаций платформенного чехла, характер новейших и современных тектонических движений и существование в прошлом и в настоящее время залежеобразующих подземных льдов [1]. Минимальные значения озерности (отношение суммарной площади озер к общей площади исследуемой территории) на полуострове Ямал (5–10%) характерны для высоких геоморфологических уровней – дренированных водораздельных пространств; максимальные (до 30%) – для речных пойм и низких террас. Озерность увеличивается на участках современного либо бывшего близкого к поверхности залегания мощных подземных льдов вследствие развития термокарстовых процессов. Концентрация озер и их размеры возрастают в зонах глубинных разломов фундамента и платформенного чехла плиты, с которыми, в свою очередь, связаны нефтегазоносные локальные структуры.

Озера Ямала являются одним из ведущих элементов ландшафта и важнейшим компонентом геокриологических условий, определяющим прерывистость ММП с поверхности и специфику их температурного режима. Спуск и возникновение озер приводит к дестабилизации состояния ММП и активизации опасных для технических объектов геокриологических процессов. В последние годы, благодаря доступности архивных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и в первую очередь космических снимков (КС) со спутников серии Landsat, стало возможным проводить масштабное исследование динамики озер на всей территории полуострова Ямал.

Ранее на основе анализа архивных аэрофотоснимков (АФС) и КС отдельных участков территории полуострова была установлена заметная и устойчивая тенденция сокращения площади крупных озер и появления хасыреев (котловин спущенных озер) при одновременном увеличении площади развеваемых песков и развитии линейного термокарста, что, скорее всего, свидетельствует о преобладающем неотектоническом поднятии значительной части полуострова Ямал [2]. Дешифрирование материалов ДЗЗ, картографирование ландшафтов и многочисленные промеры глубины озер (в процессе

инженерно-геокриологических работ) позволили выявить основные морфогенетические группы озер, различающиеся формой, глубиной и размерами [3]. Была установлена тектоническая обусловленность их распространения и генетическая связь с неотектоническими морфоструктурами – типами местностей, которые выделяются по характеру расчленения рельефа [4]. Всего было выделено 6 основных морфогенетических типов озер (рис. 1), соответствующих определенному уровню или типу местности: *лайдовые, термокарстовые (пойменные), глубоко-котловинные, хасырейные (остаточные), четковидные и тектонические* [3].

К тектоническим относятся изометричные, линейно-вытянутые или дугообразно изогнутые озера диаметром или длиной от нескольких км до 15–20 км. Эти озера связаны с зонами разломов фундамента или платформенного чехла, что дало основание считать их тектоническими образованиями. Располагаются они группами или по дуге на вершинах крупных кольцевых морфоструктур на III–IV террасах. Широкое развитие озер тектонического происхождения на полуострове Ямал связано с характерной для него разломной тектоникой [5–7]. При дренировании озер (естественном либо связанном с техногенезом) происходит промораживание талых водонасыщенных пород и таликовых подземных вод в закрытой системе, что неизбежно приводит к локальному нарушению земной поверхности, изменению условий теплообмена грунтов с атмосферой и формированию под бывшим озерным дном ледяных или льдогрунтовых тел, т. е. происходит процесс новообразования ММП. В случае спуска глубоких озер, в которые разгружаются глубинные подземные воды, в днищах хасыреев формируются бугры и гряды пучения высотой от 5–7 до 10 м (рис. 2, а).

На АФС и КС участков территории полуострова Ямал четко дешифрируются многочисленные круглые или вытянутые понижения в рельефе, представляющие собой днища древних спущенных озер (хасыреев), во многих из которых сохранились остаточные озера. Характерно, что в подавляющем большинстве остаточные озера имеют изометричную или линейно-вытянутую форму при разных размерах.

Хасыреи настолько широко развиты на полуострове, что при геокриологическом районировании территории был определен специальный тип расчлененности рельефа, или тип местности, – *хасырейный* [4]. Этот тип широко развит как в долинах рек (I–III террасы), так и на водоразделах, занимая до 30–40% площади террас преимущественно в

восточной части полуострова, однако встречается и на Западном Ямале, а также на водоразделах южнее группы озер Нейто.

Наиболее широко хасырейный тип местности распространен в центральной части полуострова, где отмечается скопление разнонаправленных разломов и сконцентрированы тектонические озера. Территориально хасырейный тип местности (и, соответственно, тип мерзлой толщи) приурочен к структурам платформенного чехла разного порядка, локализуясь главным образом на крыльях локальных структур II–III порядков (с которыми связаны газовые месторождения). При массовых промерах глубин даже мелких котловинных и остаточных озер в их днище были установлены воронкообразные углубления. При спуске озер эти углубления превращаются в остаточные озера (воронки), в которые инъецируются подземные воды – т. е. «жерла гидровулканов» (см. рис. 2, б).

Для оценки динамики современного спуска озер был проведен анализ разномасштабных и разнотипных архивных АФС и КС за период с 1969 по 2011 г. В работе использовались топографические карты масштабов 1:500 000 и 1:200 000 (составленные по съемке 1969–1970 гг.), черно-белые АФС 1969–1970 гг. съемки, КС 1980 г. (черно-белые) и спектрзональные КС спутника Landsat 2000 и 2009–2011 гг. съемки. Все съемки были проведены в летний период года.

На первом этапе сравнивались озера, отмеченные на топографических картах (на отдельных участках выделенные на черно-белых АФС), и озера, дешифрованные по КС 2000 г. съемки. Анализ заключался в сравнении формы и размеров озер на двух источниках (или фотоснимках), приведенных к одному масштабу, совмещении озер на двух изображениях и последующем оконтуривании спущенного (частично или полностью) озера. На втором этапе аналогичная работа проводилась для пары КС спутника Landsat 2000 и 2009–2011 гг. съемки. На заключительном этапе были выявлены озера, спускаемые в течение всего периода наблюдений (около 40 лет). Результаты повторного дешифрирования данных ДЗЗ с обозначением всех спущенных озер, а также схемами типов местности, геокриологических условий и разломной тектоники приведены в виде карт масштабов от 1:100 000 до 1:500 000 [3].

За 40-летний период наблюдений на большей части полуострова Ямал (до широты 68°) было выявлено около 500 озер, спущенных в разной степени. На самом деле количество спущенных озер на полуострове Ямал может быть значительно больше,

поскольку, вследствие достаточно мелкого масштаба топографических карт и космических материалов, озера диаметром менее 200 м не анализировались.

Результаты дешифрирования КС последних лет показывают, что процессы спуска озер и формирования льдонасыщенных мерзлых пород на полуострове Ямал достаточно интенсивно происходят и в настоящее время. Комплексный анализ полученных данных, материалов геолого-геофизических и геокриологических исследований, а также данных метеонаблюдений на полярной станции Марре-Сале (Западный Ямал) позволил выявить основные закономерности площадного распространения процесса спуска озер, установить его связь с неотектоническими морфоструктурами (типами местностей), локальными структурами платформенного чехла и фундамента, а также динамикой климатических условий. Процесс современного спуска озер происходит практически на всей территории полуострова Ямал, хотя и неравномерно по площади. Наибольшее количество спущенных озер сосредоточено в краевых частях полуострова, в поймах рек, на лайдах и (реже) на низких террасах. Однако в южной части полуострова (южнее озер Соханто-Сявото) спущенные озера встречаются как в долинах рек, так и на водоразделах на всех геоморфологических уровнях (в том числе и на IV равнине).

Современный спуск озер отчетливо фиксируется по данным разновременных аэрокосмических наблюдений. Недавний спуск остаточного озера в днище крупного древнего хасырея был зафиксирован в 2006–2009 гг. в районе полярной станции Марре-Сале (рис. 3) и тектонического озера Халэвто на Центральном Ямале. Наибольшее количество спущенных за последние 40 лет озер сосредоточено в пойме рек Сеяха (Мутная) и Мордыяха в пределах южной части Бованенковской структуры платформенного чехла (II порядка) на площади Бованенковского НГКМ. Скопление спущенных озер отмечено и в пределах других локальных структур платформенного чехла (II порядка): Харасавэйский вал; Северо- и Южно-Тамбейское куполовидное поднятие (КП); Тивтейяхинский Структурный Нос; Восточно-Арктический вал; Еркутаяхинское КП. Современный процесс спуска озер активно происходит на поймах многих рек и на лайдах (в устьях рек Тиутейяха, Харасавэй, Нябуяха) на западном побережье Карского моря и рек Тамбей, Юрибейтояха и Сабьяха и др., на побережье Обской губы. На речных террасах и водоразделах спускаемые в настоящее время озера в подавляющем большинстве расположены либо в днищах древних озер – хасыреях и связаны с хасырейным типом местности, либо являются глубоко-котловинными озерами

(приурочены к озерно-котловинному типу местности). Из тектонических озер отмечен частичный спуск озер Тобанто и Хэто и значительный спуск озера Халэвто. Эти озера находятся в зонах разломов платформенного чехла. Характерно, что многочисленные спущенные озера (как в группе, так и одиночные) как бы трассируют разломы фундамента и платформенного чехла.

В целом, результаты исследований свидетельствуют о широком распространении на полуострове Ямал процессов спуска озер и новообразования высокольдистых ММП. Подтверждена пространственная связь спускаемых озер с тектоническим строением полуострова (фундамента и платформенного чехла) и характером размещения в пространстве мощных залежеобразующих подземных льдов. Основной причиной современного спуска озер на полуострове Ямал является широкое развитие термоэрозионных процессов, приводящих к быстрому формированию систем логов и оврагов в линейных льдистых зонах, созданных в холодные климатические эпохи при промерзании подземных вод разных горизонтов и комплексов [1]. К числу основных факторов, приводящих к активизации термоэрозионных процессов, относятся:

- *техногенное воздействие* (этим можно объяснить скопление спущенных озер на площадях НГКМ и ГКМ);

- *вытаивание* мощных залежеобразующих подземных льдов;

- *динамика климатических условий* (глобальное потепление климата приводит к увеличению глубины сезонного протаивания и вскрытию неглубоко залегающих ледяных тел, что, по-видимому, объясняет массовое скопление спущенных озер в пределах Еркутаяхинского КП на юго-западе полуострова);

- *современная геодинамика* (именно с этим фактором обычно связывают спуск озер вне криолитозоны).

Все вышеперечисленные факторы принимают участие в процессах спуска озер и новообразования ММП на полуострове Ямал, однако выявить вклад каждого из них в настоящее время не представляется возможным. Тем не менее эта задача может быть решена по мере накопления материалов мониторинговых наблюдений, в том числе с использованием современных методов и технологий ДЗЗ.

С геодинамическими процессами, по-видимому, можно связать массовый спуск озер на морском побережье (лайды, речные поймы в устьевых частях), а также в пределах

неосвоенных пока территорий на речных террасах и высокой равнине (например, в пределах Средне-Ямальского ГКМ).

Очевидно, что процессы новообразования ММП на нефтегазовых месторождениях полуострова Ямал должны учитываться при строительстве и эксплуатации технических объектов. Вследствие высокой льдистости, наличия макроледяных тел или разгрузки напорных подземных вод (как таликовых, так и глубинных) следует избегать строительства ответственных или тепловыделяющих сооружений в днищах хасыреев. В районах осваиваемых нефтегазовых месторождений необходима организация систематических аэрокосмических и наземных наблюдений на участках со спускаемыми озерами, а также вблизи строящихся и функционирующих объектов инфраструктуры (газопроводы, железная дорога и т. д.). Так, в частности, на подобных участках уже проложены железная дорога к Бованенковскому НГКМ и первая нитка магистрального газопровода Бованенково – Байдарацкая губа.

Работа выполнена по проекту 2.3.2 *«Разработка аэрокосмических методов мониторинга природно-техногенных комплексов в районах интенсивного освоения нефтегазовых месторождений Арктики и субарктики»* Программы Президиума РАН № 27 *«Фундаментальный базис инновационных технологий прогноза, оценки, добычи и глубокой комплексной переработки стратегического минерального сырья, необходимого для модернизации экономики России»*

ЛИТЕРАТУРА

1. Крицук Л.Н. Подземные льды криолитозоны Западной Сибири. М.: Науч. мир, 2010. 350 с.
2. Аэрокосмический мониторинг природной среды полуострова Ямал / Масленников В.В., Давиденко Н.М., Корниенко С.Г., Якубсон К.И. // Газовая пром-сть, 2003. Июль. С. 72–74.
3. Крицук Л.Н., Ястреба Н.В., Корниенко С.Г. Процессы новообразования многолетнемерзлых пород на полуострове Ямал и их инженерно-геологическое значение // Инженерные изыскания в строительстве: материалы Восьмой Общерос. конф. изыскательских организаций. М., 2012. С. 85–89.
4. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции / Под ред. Е.С. Мельникова. Новосибирск: Наука, 1983. 164 с.

5. Астафьев Д.А., Скоробогатов В.А. Тектонический контроль газонефтеносности полуострова Ямал // Геология нефти и газа. М., 2006. 32 с.

6. Репин А.Г. О кайнозойской рифтовой системе на севере Западной Сибири // Сов. геология. 1988. № 12. С. 68–75.

7. Шаблинская Н.В. Разломная тектоника Западно-Сибирской и Тимано-Печорской плит и вопросы нефтегазоносности палеозоя. Л.: Недра, 1982. 155 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

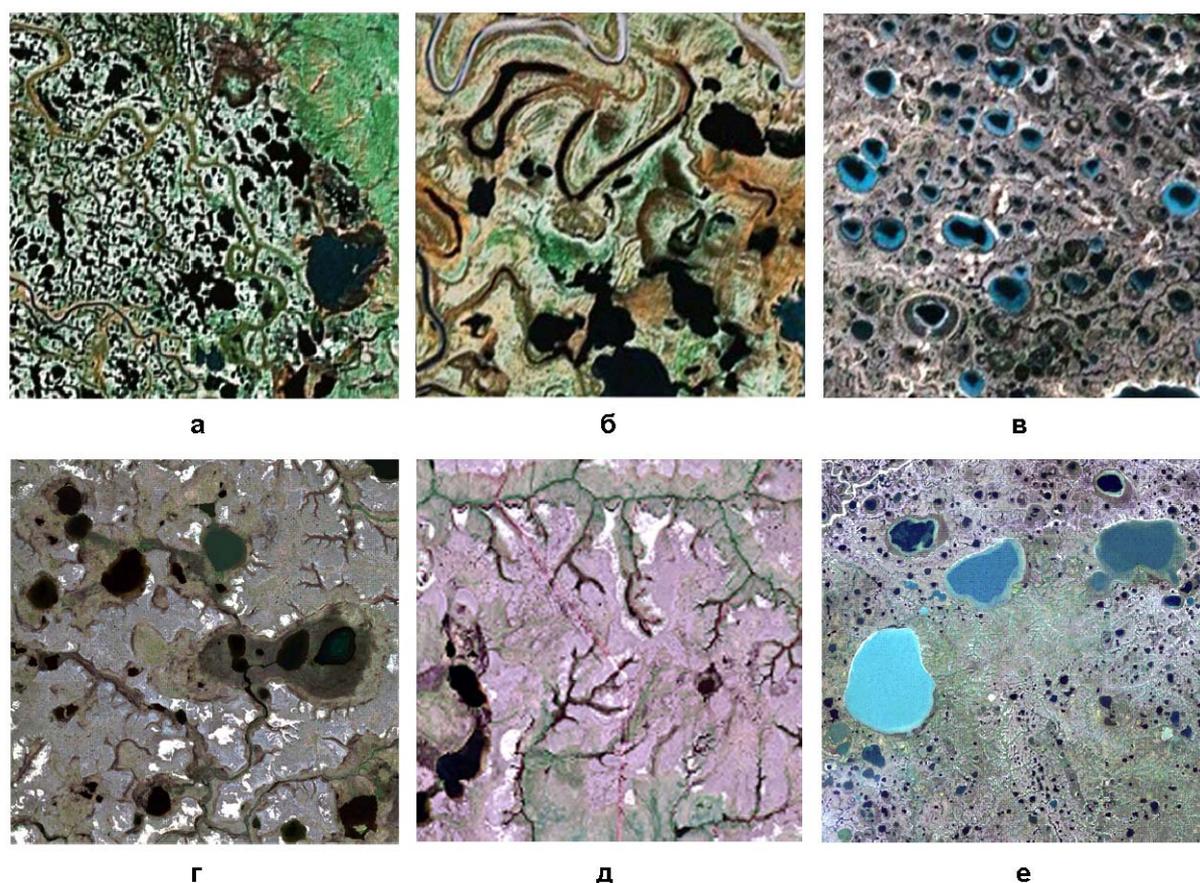


Рис. 1. Морфогенетические типы озер
а – лайдовые; б – термокарстовые (пойменные); в – глубоко-котловинные;
г – хасырейные (остаточные); д – четковидные; е – тектонические



Рис. 2. Развитие криогенных процессов в днищах спущенных озер
 а – новообразования льдогрунтовых тел в виде бугров пучения;
 б – воронкообразное углубление – «жерло гидровулкана»

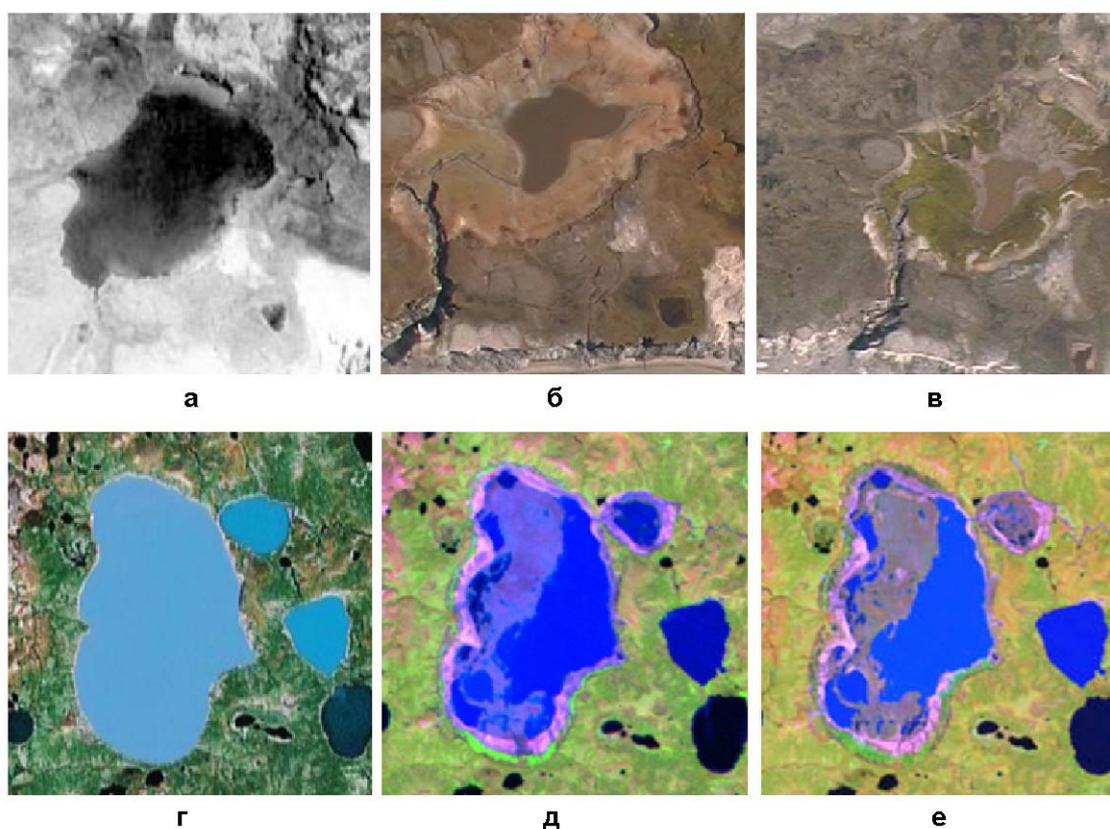


Рис. 3. Примеры современного спуска озер на полуострове Ямал: верхний ряд – остаточное озеро в районе п. Марре-Сале в 1978 г. (а), в 2006 г. (б) и в 2009 г. (в); нижний ряд – тектоническое озеро Халывто (Центральный Ямал) по КС в 2000 г. (г), 2009 г. (д) и в 2011 г. (е)