—— ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ **—**—

УДК: 581.524.323.8

ФИТОИНДИКАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ НАРУШЕНИЙ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ

© 2013 г. К.А. Ермохина*, Е.Г. Мяло**

*Институт криосферы Земли СО РАН **Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 15.05.2012 г.

Выявление территорий развития опасных экзогенных процессов в связи с освоением природных ресурсов и изменением климата Арктики является актуальной задачей, которая решается в том числе на основе широкого использования материалов дистанционного зондирования. Значительная роль при этом отводится индикационному дешифрированию, в том числе фитоиндикационному. Криогенные оползни скольжения – один из ведущих экзогенных процессов в тундрах Ямала, влияющий на структуру и динамику его растительности. В статье излагаются результаты фитоиндикационного исследования оползневых нарушений типичных тундр Центрального Ямала, предлагается комплекс методов для создания эколого-корреляционных (фитоидикационных) карт, необходимых для контроля, мониторинга и прогноза состояния экосистем полуострова.

В современных условиях активного хозяйственного освоения обширных труднодоступных регионов Крайнего Севера высокую актуальность получают задачи выявления территорий развития опасных экзогенных процессов. В настоящее время все более широкое применение при решении таких задач имеют данные дистанционного зондирования. Одним из наиболее распространенных экзогенных процессов в северных типичных тундрах Центрального Ямала является ополозневой. Представляется актуальным изучение его проявлений в растительном покрове и особенностей отражения на космических снимках.

Полевые фитоиндикационные исследования, включавшие сбор данных о растительности и определение экологических условий, проводились на научном полигоне ИКЗ СО РАН "Васькины дачи" (рис. 1), организованном для изучения криогенных оползней скольжения в междуречье рек Мордыяха и Сеяха, в 1997–2002, 2010, 2011 гг. Ключевые участки выявленных фитоиндикационных связей располагались в окрестностях станции Карская и оз. Халевто. Приносим свою благодарность участникам экспедиций, оказывавшим помощь в сборе данных для представляемого исследования.

Оползневые нарушения весьма характерны для рассматриваемой территории, где они развиваются в распространенных повсеместно засоленных глинистых отложениях. Рельеф Центрального Ямала имеет двухступенчатое строение. Верхняя ступень представлена останцами III и IV морских верхнеплейстоценовых и надпойменных верхнеплейстоцен-голоценовых террас, а нижняя ступень – плоскими поверхностями пойм рек Сеяхи и Мордыяхи [18]. В силу высокой активности экзогенных рельефообразующих процессов, ведущим среди которых является криогенное оползание, склоны морских террас занимают около 80% площади Центрального Ямала. Специфика криогенных оползней заключается здесь в значительном увеличении минерализации грунтовых вод после схода криогенного оползня, что связано с появлением на поверхности засоленных ММП [16].

Оползневая активность в регионе имеет определенную цикличность. В настоящее время в литературе [17, 20, и др.] принято выделение трех возрастных генераций криогенных оползней Ямала – молодые оползневые структуры (оползни, образовавшиеся около 35 лет назад), старые (возраст до 300 лет) и древние (возраст 300–2000 лет). Растительный покров склонов морских террас сформирован ерниково-ивняковыми (союз Equiseto– Salicion glaucae¹), ерниковыми (ассоциация Vaccinio–Betuletum nanae) и мохово-травяными

¹ В скобках приведена номенклатура синтаксонов растительности по флористческой классификации, выполненной нами для Центрального Ямала [11, 12].



Рис. 1. Положение модельной территории

(ассоциация Luzulo–Polytrichetum juniperinum) сообществами и разнотравно-злаковыми лугами (ассоциация Alopecuretum pratensis).

Развивающиеся криогенные оползни скольжения вызывают постоянное омоложение поверхности и значительные трансформации экотопов, приводящие к катастрофическим сукцессионным сменам растительности. В одной из предыдущих публикаций [12] нами подробно рассмотрены связи растительности с различными параметрами оползневых местообитаний: характеристиками СТС, микрорельефом, геохимическим составом грунтовых вод, возрастом поверхности и другими.

Цель данной статьи – выявление особенностей проявления оползневого процесса в растительном покрове и фитоиндикационное дешифрирование космических снимков для создания эколого-корреляционных карт.

При развитии экзогенного процесса весь набор сообществ, слагающих растительный покров, обычно составляет один или несколько близких эколого-динамических рядов, включающих фитоценозы от пионерных стадий развития до вполне сформированных условно-коренных сообществ [10]. На различных участках оползневых структур (центральных и периферических частях поверхностей скольжения и оползневых тел) сукцессионные процессы имеют свои особенности, что находит отражение в формирование четырех эколого-динамических рядов растительности, образующих сложную сукцессионную систему (рис. 6). Число членов эколого-динамических рядов, теснота связей между ними преимущественно зависят от положения участка относительно траектории движения оползня и типа образовавшейся оползневой структуры. Ход сукцессии контролируется внутренней динамикой развития растительности и ходом восстановления исходных параметров экотопа (мощности СТС, степени минерализации и геохимического состава грунтовых вод, характера микрорельефа и др.).

В ходе сукцессии во всех эколого-динамических рядах наиболее заметные изменения происходят в продуктивности сообществ, возрастающей по мере восстановления растительности. На начальных и промежуточных стадиях сукцессии наибольший вклад в общую фитомассу сообществ вносят высокопродуктивные популяции кустарниковых ив (доминирует Salix glauca). Ближе к финальным стадиям сукцессии наблюдается снижение, а затем повышение значений общей фитомассы, что связано со сменой ее доминирующих структурных частей – на этих стадиях Salix glauca резко снижает участие в сообществах, а мхи, наоборот, его повышают. По всей видимости, наблюдаемое возрастание фитомассы Salix glauca связано с повышением обеспеченности растений начальных и промежуточных стадий восстановительной сукцессии элементами минерального питания за счет растворения в грунтовых водах химических веществ и соединений, содержащихся в ММП, что согласуется с выводами Н.Г. Украинцевой [24]. Этот вид предложено использовать в качестве одного из ведущих индикаторов в типичных тундрах Ямала при выявлении участков, затронутых криогенными оползнями, так как он появляется уже на стадии молодых оползневых структур, образуя сомкнутый кустарниковый покров (высотой часто более 1 м) примерно через 100-150 лет после схода криогенного оползня.

Развитие таких ивняков на склонах отмечено для полосы типичных тундр Ямала, Гыдана и некоторых районов Канады [1, 9, 19, 21]. В южных тундрах Ямала на аналогичных ландшафтных позициях распространены низкорослые сообщества с *Betula nana*, а в арктических тундрах – кустарничковые с преобладанием *Salix polaris* и *Dryas octopetala*. Отсутствие таких сообществ в южных тундрах, по-видимому, связано с протаиванием с поверхности ММП в голоценовый оптимум и выносом содержавшихся в них морских солей [16, 24]. В арктических тундрах развитие ивняков скорее всего ограничено слишком низкими для *Salix glauca* температурами.

Склоны морских террас Центрального Ямала представляют собой сложные системы оползней разных возрастных генераций, часто частично друг друга перекрывающих, что затрудняет визуальное выделение оползневых структур (поверхностей скольжения и оползневых тел). При наземных исследованиях эффективно использование выявленного комплекса фитоиндикаторов, который включает 1) дифференциальные виды синтаксонов растительности; 2) индикаторные виды; 3) общую надземную фитомассу сообществ, фитомассу Salix glauca и мхов; 4) набор биоморф высших растений [12]. При разном масштабе исследований значение отдельных индикаторов комплекса может изменяться.

На тесную связь между характером растительного покрова, литологией почвообразующих пород и экзогенными процессами указывают многие исследователи [2–5, 7, 8, 13]. Закономерности распространения экзогенных процессов находят отражение в структуре растительного покрова [6], под их действием формируются серии и комплексы растительных сообществ – наиболее сложный тип структур растительного покрова [10].

Растительный покров склонов морских террас представляет собой совокупность микрокомбинаций растительных сообществ, включающую комплексы сообществ, занимающих одновозрастные оползневые структуры, и комплексы сообществ, занимающих склоны с невыраженным оползневым микрорельефом. Комплексы обычно четырехчленные (рис. 2), члены комплексов являются звеньями различных сукцессионных рядов растительности. Элементы комплексов могут значительно различаться по занимаемой площади, границы между сообществами и комплексами достаточно четкие.

Сопоставление типов структур растительного покрова показало, что они существенно различаются в зависимости от давности оползневого нарушения. Комплексы сообществ, соответствующие разновозрастным оползневым структурам, объединяются в один тип комплексов, при этом комплексы связаны с возрастом нарушений, а тип комплексов – с его оползневым характером. На склонах с невыраженным оползневым микрорельефом представлен другой тип комплексов, не обладающий столь четкой структурой.

При составлении карт растительности и эколого-корреляционных карт в зависимости от масштаба находят отражение как конкретные синтаксоны, так и комплексы и их типы. Масштабы фрагментов карт растительности на рисунке 3aи 3b одинаковы. На рис. 3a показаны все члены комплексов, связанные со всем выявленным разнообразием экотопов. На рис. 3b находят отражение комплексы сообществ, проявляющих более высокий уровень экологических связей (с возрастом поверхности). Сочетание комплексов оползневых структур и комплексов склонов с невыраженным оползневым микрорельефом образуют мезокомбинацию сообществ, приуроченную к склонам морских террас Ямала, что проявляется



Рис. 2. Схема приуроченности выделенных синтаксонов растительности к типам местообитаний (здесь и далее: 1) – субассоциации ассоциации Poo-Caricetum concolor, 2) – субассоциации ассоциации Bistorto-Betuletum nanae)

при дальнейшей генерализации и в более мелком масштабе (рис. 3*в*).

Цикличность криогенных оползней скольжения, как было показано М.О. Лейбман и А.И. Кизяковым для территории Центрального Ямала [16], обусловлена сочетанием климатических факторов и определенных геокриологических условий (большого количества прошедших циклов промерзания-протаивания СТС и накопившегося по разным причинам напряжения в верхних слоях пород). Благоприятные геокриологические условия для развития криогенных оползней скольжения формируются примерно 300 лет, дополнительное время уходит на "ожидание" сочетания определенной влажности пород СТС и необходимого "теплового удара", т.е. определенных климатических условий. Периоды активизации разделены периодами относительной стабильности, составляющими 290-460 лет.

Цикличность криогенного оползания на Центральном Ямале обусловливает сложную структуру растительного покрова склонов морских террас за счет создания разновозрастных и разномасштабных нарушений и, следовательно, разновременности начала восстановительной сукцессии растительности на разных участках склонов. Рисунок растительного покрова усложняет частое "наложение" оползневых структур друг на друга и различная степень трансформации нарушенных местообитаний, которая зависит от величины сошедшего оползня, положения участков относительно траектории его движения и типа образовавшейся оползневой структуры. В результате растительный покров склонов морских террас об-



Рис. 3. Схема объединения растительных сообществ склонов морских террас в микро- и мезокомплексы (условные обозначения: ПС – поверхность скольжения; ОТ – оползневое тело; НОМ – невыраженный оползневой микрорельеф; *l* – стадия молодых оползневых структур; *2* – стадия старых оползневых структур)

разует пеструю мозаику, элементы которой представляют собой разные стадии восстановления растительности после схода криогенного оползня скольжения (разница относительных возрастов этих элементов, по нашим предположениям, может составлять до 7000 лет) и занимают участки различной площади. Часть элементов мозаики представлена ивняковыми сообществами, формирующимися благодаря значительному увеличению минерализации надмерзлотных грунтовых вод после схода криогенных оползней скольжения.

Применение методов геоинформационного картографирования позволяет решить задачи составления серии эколого-корреляционных карт [15], отражающих выявленные связи комплекса растительных индикаторов и ведущего экзогенного процесса. Разработанный комплекс фитоиндикаторов можно использовать не только в наземных условиях, но и в целях дистанционной индикации степени развития оползневых криогенных процессов. Показатели структуры растительных сообществ, их фитомасса и проективное покрытие находят отражение на космических снимках, что позволяет дешифрировать пространственное распределение растительности, а следовательно, и распределение объекта индикации.

Для определения пространственного распространения участков активизации криогенного оползания и отражения на картах выявленных индикационных закономерностей была составлена ГИС на территорию западной части Центрального Ямала площадью около 4000 км². В основу ГИС были положены выявленные закономерности структуры растительного покрова. Рабочим масштабом был принят 1:25 000.

Созданная фитоиндикационная ГИС включает следующие слои.

1. Морфологическую карту рельефа, отражающую характер перемещения материала. Карта разработана на основе топографической карты масштаба 1:25 000. С использованием полуавтоматизированных методов были выделены зоны денудации (приводораздельные поверхности), зоны транзита материала (склоновые поверхности, на которых возможно развитие криогенных оползней скольжения) и зоны аккумуляции материала (долинные комплексы, плоские береговые зоны озер, озерные котловины и хасыреи). При дальнейшем анализе мы работали в границах второй зоны.

2. Карту поверхностных отложений, составленную на основании почвенной карты России, изданной в рамках проекта *Circumpolar Active-Layer Permofrost System*, 2003 [21], и большого количества литературных данных и опубликованных картографических материалов. Зона транзита материала практически полностью занята склонами



Рис. 4. Экспоненциальная зависимость величины индекса NDVI от общей надземной фитомассы растительных сообществ (по данным с модельного участка "Васькины дачи"); комплексы сообществ: *1* – на молодых оползневых структурах; *2* – на склонах с невыраженным оползневым рельефом; *3* – на старых оползневых структурах; *4* – на древних оползневых структурах





водоемы растительные сообщества сукцессионной систелоползневых склонов отсутствуют

Рис. 5. Фрагмент фитоиндикационной карты оползневого процесса (модельный участок "Васькины дачи")

III и IV морских террас, сложенными глинистыми и суглинистыми засоленными отложениями.

3. Серию отдешифрированных АФС модельных участков и прилегающих к ним территорий (на АФС в полевых условиях наносились контуры описываемых растительных сообществ и участки развития процессов криогенного оползания, точечным способом показывались характеристики микро- и нанорельефа, мощность СТС, основные характеристики почв, глубина вскрытия надмерзлотных грунтовых вод и др.). 4. Серию полевых картосхем растительности.

5. Слой, содержащий значения вегетационного индекса NDVI². Слой был составлен с помощью космического снимка Landsat ETM+. Космический

² Согласно [25], нормализованный относительный индекс растительности NDVI – показатель количества фотосинтетически активной биомассы; по формуле его значение в определенной точке получаемого изображения равно разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму этих интенсивностей.

ЕРМОХИНА, МЯЛО



Рис. 6. Экспликация к легенде фитоиндикационной карты оползневого процесса

снимок, использованный в работе, был сделан в конце июля, то есть в максимально фотосинтетически активное для тундровой растительности время.

6. Фитоиндикационные карты оползневого процесса (Фитоиндикационная карта оползневого процесса масштаба 1:25 000, Генерализованная фитоиндикационная карта оползневого процесса масштаба 1:150 000 и Фитоиндикационная карта потенциальной активизации оползневого процесса того же масштаба).

Нам удалось установить зависимость величины индекса NDVI от величины общей надземной фитомассы для склонов морских террас Центрального Ямала (рис. 4). В целом полученные зависимости весьма сходны с результатами аналогичных работ по тундровой зоне [21–23, 25]. Зависимость индекса NDVI от общей надземной фитомассы сообществ характеризуется экспоненциальным характером.

Слой ГИС, содержащий значения вегетационного индекса NDVI, был автоматически отклассифицирован на основании построенных матриц соответствия комплексов сообществ и диапазонов значений NDVI. В итоге мы получили собственно фитоиндикационные карты оползневого процесса. Легенды всех построенных фитоиндикационных карт имеют матричную форму, наиболее подходящую для отражения выявленных экологических связей.

Группировка сообществ в рубрике легенды Фитоиндикационной карты оползневого процесса (рис. 5) проведена с учетом их расположения на оползневых структурах разного возраста и, таким образом, каждый растительный выдел легенды представляет собой комплекс сообществ. Выделы карты несут в себе как информацию о типологических единицах растительного покрова ассоциациях и субассоциациях, так и о наиболее физиономичных показателях растительности, использованных при фитоиндикационном дешифрировании, – фитомассе сообществ (а также массе Salix glauca и мхов), которая находит свое отражение в значениях вегетационного индекса NDVI, приведенных в легенде для каждого выдела. По горизонтали в матричной леденде откладываются стадии восстановления растительности (с указанием временных периодов), а также наиболее надежный индикационный признак этих стадий – минерализация надмерзлотных грунтовых вод и концентрация в них Cl⁻. Экспликации к легенде карты (рис. 6) отражают сукцессионные связи сообществ синтаксонов и содержание некоторых химических элементов и соединений в грунтовых водах.

В легенде Генерализованной фитоиндикационной карты оползневых процессов нашли отражение связи более высокого фитоиндикационного уровня – связи мезокомплекса растительных сообществ с определенным генетическим типом поверхностных отложений и присущими им формами мезорельефа и типами процессов.

Проведенный анализ показал различия в степени сформированности растительности на разных стадиях эколого-динамических рядов, что в сочетании с данными по цикличности криогенных оползней Ямала [16] позволило выявить участки, потенциально наиболее уязвимые к развитию оползневого процесса в будущем [12]. Эти результаты нашли отражение на Фитоиндикационной карте потенциальной активизации оползневого процесса.

Территория исследования полностью относится к области сильной и очень сильной потенциальной активизации мерзлотных процессов при сохранении современных климатических тенденций [14]. Участки, трансформированные криогенными оползнями скольжения, распределены относительно равномерно. Наибольшее распространение имеют старые и древние оползневые структуры, причем более 40% приходится на старые структуры. Молодые оползни занимают чуть более 3% территории, площадь склонов с невыраженным оползневым микрорельефом, потенциально наиболее подверженных развитию оползневого процесса, составляет около 5% модельной территории.

Экологические связи, установленные на научном полигоне, действуют в пределах всей полосы северных типичных тундр Центрального Ямала, что подтверждают проведенные на ключевых участках проверки. Предлагаемый комплекс методов и представляемый результат может быть использован как основа мониторинга состояния экосистем Ямала в связи с хозяйственным освоением. Использование методики на других территориях (полуостров Гыдан, северные территории Канады и др.) возможно при подробном изучении всего комплекса физико-географических условий и выявлении ботанико-географических связей растительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Александрова В.Д. Геоботаническое районирование Арктики и Антарктики // Комаровские чтения. № 29. Л.: Наука, 1977. 189 с.
- 10 ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ № 5 2013

- 2. Беликович А.В. Ландшафтная флористическая неоднородность растительного покрова. Владивосток: БПИ ДВО РАН, 2001. 248 с.
- 3. Викторов А.С. Основные проблемы математической морфологии ландшафта. М.: Наука, 2006. 252 с.
- 4. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: Мысль, 1986. 179 с.
- 5. Викторов С.В., Ремезова Г.Л. Индикационная геоботаника. М.: Изд-во МГУ, 1988. 168 с.
- 6. Виноградов Б.В. Основы ландшафтной экологии. М.: ГЕОС, 1998. 418 с.
- Виноградов Б.В. Растительные индикаторы и их использование при изучении природных ресурсов. М.: Высш. шк., 1964. 328 с.
- Галанин А.В. Флора и ландшафтно-экологическая структура растительного покрова. Владивосток: Изд-во ДВО АН СССР, 1991. 272 с.
- 9. Городков Б.Н. Растительность тундровой зоны СССР. М.- Л.: Изд-во АН СССР, 1935. 142 с.
- Грибова С.А., Исаченко Т.И. Картирование растительности в съемочных масштабах // Полевая геоботаника, Вып. 4. Л.: Изд-во АН СССР. 1972. С. 137–331.
- 11. Ермохина К.А. Фитоиндикация экзогенных процессов в тундрах Центрального Ямала: Автореф. дис. канд. геогр. наук. М., 2009. 24 с.
- Ермохина К.А., Мяло Е.Г. Фитоиндикация оползневых нарушений на Центральном Ямале // Материалы Х международной конференции по мерзлотоведению. Салехард, 25–29 июня 2012.
- Ермохина К.А., Украинцева Н.Г. Фитоиндикация геокриологических условий (литологических и геохимических особенностей СТС) в типичных тундрах Центрального Ямала // Мат-лы год. Сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии – "Сергеевские чтения". М., 2003. С. 385–389.
- 14. Карта активизации мерзлотных процессов 1:20 000 000 / Под ред. Востоковой А.В. // Экологический атлас России. М.: Изд-во географ. ф-та МГУ и ЗАО "Карта", 2004.
- Ландшафтно-интерпретационное картографирование / Под ред. Черкашина А.К. Новосибирск: Наука, 2005. 423 с.
- 16. Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Изд-во ИКЗ СО РАН, 2007. 206 с.
- 17. Лейбман М.О., Кизяков А.И., Арчегова И.Б., Горланова Л.А. Этапы криогенного оползания на Югорском полуострове и Ямале // Криосфера Земли. 2000. Т. 4. № 4. С. 67–75.

- Природная среда Ямала / Под ред. Цибульской В.Р., Валеевой Э.И., Арефьева С.П., Мельцер Л.И. и др. Т. 2. Тюмень: ИПОС СО РАН, 1995.
- Растительный покров Западно-Сибирской равнины / Под ред. В.В. Воробьева и А.В. Белова. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
- Украинцева Н.Г. Ивняковые тундры Ямала как индикатор засоленности поверхностных отложений // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 182–187.
- 21. Циркумполярная карта растительности Арктики (М 1 : 7 500 000). CAVM Team, 2003.
- 22. Jia, G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Greening of Arctic Alaska // Geophys. Res. Lett. №30 (20). 2003. P. 1981–2001.

- 23. Stow D.A., Hope A.S., Boynton W. et al. Satellitederived vegetation index and cover type maps for estimating carbon dioxide flux for arctic tundra regions // Geomorphology, V. 21. 1998. P. 313–327.
- 24. Ukraintseva N. Vegetation Response to Landslide Spreading and Climate Change in the West Siberian Tundra // Proc. Ninth Int. Conf. on Permafrost. Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, 2008. V. 2. P. 1793–1798
- 25. Walker D.A., Leibman M.O. Epstein H.E. et al. Spatial and temporal patterns of greenness on the Yamal Peninsula, Russia: interactions of ecological and social factors affecting the Arctic normalized difference vegetation index // Environmental Res. Lett. 2009. V. 4. № 4.

Phytoindication mapping of landslide disturbances in the Central Yamal

K.A. Ermokhina*, E.G. Myalo**

*Institute of the Earth's Cryosphere, Siberian Branch, RAS

**Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography

Identification of areas of dangerous exogenous processes is an urgent problem to be solved due to the development of natural resources and climate change in the Arctic. This task is solved using various methods, including the widespread use of remote sensing. Indicative decoding, including phytoindication, plays significant role. Cryogenic flow slides are one of the leading exogenous processes in the tundra of Yamal, influencing the structure and dynamics of vegetation. The article presents the results of the phytoindication study of landslide violations of typical tundra of Central Yamal. The set of methods is proposed for creating eco-correlation (phytoindication) maps necessary for control, monitoring and management of ecosystems of peninsula.