

«Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения

А. А. Тишков¹, доктор географических наук,
А. Н. Кренке-мл.², кандидат географических наук
ФГБУН Институт географии РАН

В 2014–2015 гг. с использованием дистанционных методов зондирования Земли проведены обзорные оценки движения границы леса на север, «позеленения» и «закустаривания» тундры и влияния этих процессов на биологическую продуктивность ландшафтов российской Арктики, что позволило выявить перспективы их разномасштабных, разновременных и разнонаправленных изменений в условиях синергизма действий меняющегося климата и расширяющейся хозяйственной деятельности. Показано, что на современном этапе в Арктике наблюдаются одновременно как процесс роста продуктивности («позеленение»), который рассматривается как эффект синергизма действия потепления климата и хозяйственного освоения, и ее снижения за счет антропогенной трансформации ландшафта.

Ключевые слова: Арктика, арктические и приарктические регионы, «позеленение», «закустаривание», «олуговление» и «делихенизация» тундры, биологическая продуктивность, вегетационный индекс NDVI, тренды биоты.

Введение

Арктика — один из четырех регионов мира, отнесенных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) к наиболее уязвимым по отношению к изменениям климата [9]. Изменения в арктических сообществах под влиянием климата показаны прежде всего для североамериканского сектора Арктики [44]. Имеются отдельные публикации, позволяющие сделать вывод и о реакции тундровых экосистем России — «позеленении» тундр, например на островах Баренцева моря [14] и на полуострове Ямал [38]. Получаемые со спутников изображения земной поверхности свидетельствуют о возрастании за последние десятилетия усредненного значения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), отражающего степень «позеленения» территории, что обусловлено увеличением надземных запасов и продукции фитомассы в условиях роста продолжительности вегетационного периода.

Интернациональный коллектив экспертов [48] проанализировал данные спутниковых съемок с 1982 по 2008 гг. и установил, что в высоких широтах канадской Арктики, северной Аляски и западной Гренландии рост максимальных значений NDVI

достигает 15%. Увеличение NDVI авторы связывают с потеплением, обусловленным разрушением многолетнего ледяного покрова в 50-километровой зоне вдоль берега и в целом с сокращением сроков ледового режима. Тенденции, выявленные при анализе спутниковых данных, в последние годы были подтверждены долговременными наземными исследованиями «поведения» тундровой растительности на модельных площадках в рамках международных проектов ITEX (International Tundra Experiment) и BTF (Back to the Future). Показано, что в течение последних 25—30 лет наиболее заметные изменения (возрастание надземной и подземной фитомассы, увеличение обилия доминирующих видов) произошли в районах высокоширотной Арктики [31; 48]. Эти изменения, по мнению авторов, были ответом на повышение температуры воздуха за последние десятилетия. Возрастанию запасов фитомассы сопутствовали увеличение продолжительности вегетационного периода (например, расширение периода положительных температур в конце лета) и более глубокое протаивание активного слоя почв.

Анализ состава и структуры растительности Аляски позволил в свое время установить увеличение проективного покрытия и высоты растительного покрова, усложнение структуры сообществ, а также повышение относительного обилия трав при снижении покрытия лишайников и мхов [31; 33; 37].

¹ e-mail: tishkov@biodat.ru.

² e-mail: ankrenke@mail.ru.

Эти изменения авторы объяснили возрастанием температуры почвы, таянием вечной мерзлоты, улучшением снабжения растений водой и питательными веществами. Ранее для всей циркумполярной Арктики и непосредственно для Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) эти закономерности на начальном этапе были показаны Н. И. Базилевич и А. А. Тишковым [32] при анализе закономерностей продуктивности тундрового биома.

Материалы и методы

Природные и антропогенные изменения арктических ландшафтов, в том числе процессы естественного (климатогенного) повышения их продуктивности — «позеленения» тундры в результате увеличения проективного покрытия древесно-кустарниковой и травянистой (преимущественно осоково-злаковой) растительности, в последние десятилетия могут быть эффективно оценены путем сравнения разногодичных данных дистанционного зондирования. В настоящее время накоплен значительный архив материалов разного рода дистанционных измерений начиная с 1980-х годов. Для данной работы с учетом значительных площадей и необходимости достаточной повторяемости измерений оптимальными оказались материалы сенсора MODIS, космические снимки с разрешением 2×2 км, позволяющие одновременно охватить российский сектор территорий, примыкающих к Северному Ледовитому океану. Данный сенсор начал свою работу в 2000 г., диапазон его спектральных каналов подобран специально для исследования состояний растительности, разрешение снимка позволяет оперативно обрабатывать большие территории и обеспечивать необходимую повторяемость измерений (вести почти непрерывные наблюдения состояния растительности). Существуют различные подходы и методы исследования динамики ландшафтов на глобальном и региональном уровнях на основе этого сенсора [41; 42]. В настоящей статье предложен подход к выявлению трендов динамики, оценке состояния и продуктивности арктических экосистем на основе сравнения рядов дистанционных данных. Демонстрация подхода производится для преимущественно безлесных территорий севера европейской части России, Западной и Центральной Сибири.

Для упрощения анализа, так как задача исследований не определяется выявлением сдвигов в составе и структуре растительного покрова, а лишь в определении природы пространственной и временной динамики состояния ландшафта, ландшафтный покров условно был разделен на два типа:

- «продуктивный», усложненный в надземной сфере двумя-тремя ярусами растительности; сюда входят фрагменты древесной и кустарниковой растительности и, возможно, участки «олуговения» с доминированием осок и злаков на месте мохово-лишайниковых и мохово-кустарничковых коренных сообществ;

- «низкопродуктивный», лишенный кустарниковой и древесной растительности, в том числе с преобладанием фоновых тундровых и болотных территорий, а также участков с трансформированной (механически, за счет пожаров, вырубки или загрязнения) растительностью (лесотундры, «островов» леса в тундре, очагов антропогенных нарушений растительности кустарниковых, типичных и арктических тундр).

Предложенными методами планировалось определить пространственные изменения, а также возможные изменения продуктивности надземной растительности условно определенных типов ландшафтного покрова. Алгоритмически работа была разделена на два этапа:

- составление ландшафтной карты рассматриваемого макрорегиона «арктических и приарктических территорий», анализируемых с помощью дистанционных методов макрорегиона с разбиением на «продуктивные», в том числе древесно-кустарниковые, и «низкопродуктивные», фоновые, безлесные территории;
- сравнение продуктивности основных типов ландшафта за 2000 и 2014 гг., а также выделение территорий с трендами увеличения или уменьшения запасов фитомассы.

Первый этап работы выполняется по технологии актуализации тематических карт на основе дистанционной информации [11; 12]. Эта технология опирается на следующие основные постулаты:

- мультиспектральная отраженная радиация, измеряемая со спутника, несет в себе информацию о фундаментальных процессах преобразования солнечной энергии земной поверхностью, определяемых составом растительности, почвенно-геохимическими условиями и увлажнением в конкретной территориальной единице измерения (пикселе);
- свойства растительности и почв — функция формы земной поверхности, количественно описываемая через трехмерную модель рельефа;
- если специальная (тематическая) карта достаточно надежно отражает реальность, то она должна статистически значимо воспроизводиться через мультиспектральную информацию и характеристики рельефа;
- если воспроизводимость доказана, то можно на основе полученной зависимости обосновать формальный алгоритм интерполяции состояний объекта картографирования на всю территорию, охваченную картой и, соответственно, получить карту актуализированного состояния ландшафта и его компонентов (в том числе растительности).

В качестве картографической основы взят фрагмент карты растительности СССР 1:4 000 000 [8]. Масштаб карты и ее легенда позволяют отразить основные ландшафтные типы рассматриваемого региона и в целом соответствуют используемому разрешению данных дистанционного зондирования.

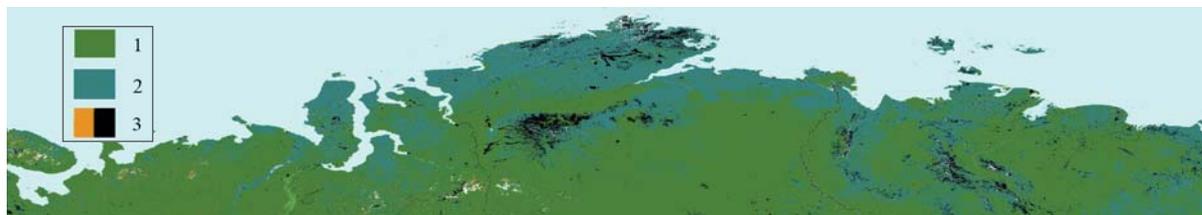


Рис. 1. «Продуктивные» (1) и «низкопродуктивные» (2) ландшафтные покровы арктических и приарктических территорий России по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) 2000 г.; 3 – искажения, водоемы, скальные обнажения



Рис. 2. «Продуктивные» (1) и «низкопродуктивные» (2) ландшафтные покровы арктических и приарктических территорий России по данным ДЗЗ 2014 г.; 3 – искажения, водоемы, скальные обнажения

Воспроизведение осуществляется средствами дискриминантного анализа, который позволяет измерить, насколько одно дискретное состояние отличается от другого в пространстве выбранных континуальных переменных (в данном случае каналов мультиспектральной съемки). Метод определяет меру линейной связи каждого состояния с различными внешними переменными. Фактически дискриминантный анализ проводит сокращения исходного пространства переменных через набор линейных функций типа

$$X_i = a_1 v_1 + a_2 v_2 + \dots + a_n v_n,$$

где X_i — i -е дискретное состояние дискриминируемой переменной (тип ландшафтного покрова); $a_n v_n$ — n -я внешняя переменная и соответствующий ей коэффициент.

Коэффициенты выбираются таким образом, чтобы разница между разными состояниями дискриминируемой переменной была наибольшей.

В результате получаем оси, построенные как линейные функции от ведущих внешних переменных. Эти оси могут быть интерпретированы как параметры порядка, описывающие исследуемую динамическую систему. Каждая ось интегрирует в себе физический смысл отдельных каналов съемки и может быть рассмотрена как динамический биофизический индекс.

Также средства дискриминантного анализа предоставляют в качестве результата вероятностные поля, для каждого дискретного состояния определяющие достоверность его встречаемости на каждом участке реального пространства. В данном случае распознавались всего два состояния ландшафтного покрова: «продуктивное» (с древесно-кустарниковой,

кустарниковой и травяной растительностью) и «низкопродуктивное» (безлесное, чаще всего мохово-лишайниковые, травяно-моховые, кустарничковые и травяно-кустарничковые тундры). Качество распознавания на космических снимках составило более 0,9 для каждого срока (2000 и 2014 гг.). В результате было получено достоверное пространственное распределение двух основных типов ландшафтного покрова — «продуктивных» и «низкопродуктивных» (рис. 1 и 2).

Результаты исследований и их обсуждение

Актуальная картина «позеленения» арктических и приарктических территорий России. На основе пространственного совмещения рис. 1 и 2 были определены места перехода одного класса в другой. В количественном выражении они отображены в табл. 1. Суммарно площадь распространения древесно-кустарниковой и другой продуктивной растительности (собственно «позеленения» тундры) составила 3 074 328 км², тогда как деградация ландшафта, замена продуктивных растительных сообществ менее продуктивными (в том числе за счет перевыпаса домашних оленей, пожаров, механических нарушений, химического загрязнения и пр.) составила 3 140 687 км². Таким образом, можно сказать, что процессы «позеленения» и деградации в границах арктических и приарктических территорий в масштабах последних двух десятилетий, по видимому, компенсируют друг друга в абсолютных показателях, однако наблюдается значительная пространственная дифференциация в их проявлении, что отражено на рис. 3.

«Позеленение» южных тундр как следствие продвижения границы леса на север. На рис. 3 показаны арктические и приарктические территории,



Рис. 3. Новые «продуктивные» (1) и «низкопродуктивные» (2) состояния ландшафтного покрова арктических и приарктических территорий России, выявленные при сопоставлении данных ДЗЗ 2000 и 2014 гг.

Таблица 1. Соотношение доли площадей, занимаемых разными типами ландшафтного покрова арктических и приарктических территорий Российской Федерации в 2001 и 2014 гг., %

| 2001 | 2014 | |
|---------------------|----------------|---------------------|
| | «Продуктивный» | «Низкопродуктивный» |
| «Продуктивный» | 88,18 | 9,90 |
| «Низкопродуктивный» | 21,89 | 75,96 |

которые в первое десятилетие XXI в. стали более продуктивными, в том числе за счет активного продвижения границы леса на север. Так, анализ выявил следующие пространственные изменения в состоянии древесно-кустарниковой растительности вдоль южной границы арктических и приарктических областей:

- восстановление древесной и кустарниковой растительности в Хибинах;
- формирование продуктивных древесно-кустарниковых покровов вдоль побережья Чешской губы, междуречий рек Омы, Индиги, Пеши в Малоземельской тундре;
- формирования очагов лесной растительности в низовьях реки Печоры;
- появление новых участков леса в долинах рек Полярного Урала, на юге полуостровов Ямал и Тазовский;
- расширение лесных островов на Восточном Таймыре (Ары-Мас и реки Белой);
- продвижение на север древесно-кустарниковой растительности в низовьях Анабары, Оленека, Лены, Яны и Индигирки.

Еще в середине XX в. В. Н. Андреев [2] сопоставил данные о положении современной границы леса и лесных островов в тундре с их состоянием в прошлом (по материалам исследований А. Г. Шренка, Г. И. Танфильева, Р. Поле и др.) и установил, что в местах, где древесная растительность наблюдалась 50—100 лет назад, она прочно удерживает позиции, а площади большинства северных лесных островков, находившихся ранее в угнетенном состоянии, развивались, на месте тундровых участков появились новые лесные островки. О «зоне относительного безлесья» европейских тундр говорил и писал В. В. Крючков [10], который связывал это

явление с многовековой хозяйственной деятельностью на северном пределе леса — заготовкой топлива, пожарами, выпасом оленей и др. Исследования О. В. Лавриненко и И. А. Лавриненко [14] позволили утверждать, что с начала XX в. стартовал новый этап экспансии леса на север, связанный с внутривековыми циклами потепления климата, которое продолжается и в настоящее время. Оно способствует не только смещению границы ареала ели сибирской на север, в частности, продвижению ее по долинам тундровых рек, текущих в меридиональном направлении, но и увеличению площади островных ельников. Сопоставив описания ландшафтов, увиденных А. Г. Шренком в его экспедиции по Большеземельской тундре в 1837 г., с современной картиной, авторы утверждают, что за последние 165 лет произошло продвижение ели на север по долинам рек Сандивей (левый приток реки Колвы) и Северной, а также расширение площади еловых островов в бассейнах рек Ортина и Море-Ю.

Во многих регионах Арктики рядом авторов в последнее время отмечается прогрессирующий характер развития лесной растительности на северном пределе. В Арктической зоне Российской Федерации семенное возобновление и подрост лиственницы в тундрах зафиксированы в Западной Сибири, на Таймыре в лиственничных массивах Ары-Мас и в полосе редколесий на северном берегу реки Новой, что выявляется и на космических снимках. В горных районах Полярного Урала заметно продвижение лиственниц вверх по склону на 20—60 м на протяжении всего XX в. Продвижение к северу границы леса связано прежде всего с изменением глубины протавивания деятельного слоя почв и повышением температуры многолетнемерзлых грунтов. Однако, несмотря на проявление положительного температурного

тренда в конце XX — начале XXI в., повышение температуры многолетнемерзлых пород происходит неравномерно как во времени, так и в пространстве [4]. В АЗРФ данные мониторинга на восьми геокриологических стационарах от дельты Печоры до Колымы отмечено потепление многолетних мерзлых пород (ММП), особенно в лесотундре европейского Севера и Западной Сибири [6]. Также следует отметить цикличность в продвижении древесных видов на север. Общий тренд границы предтундровых редколесий к северу составил за последние 30 лет от 10 до 30 км [42].

Северная граница леса, как правило, включается в арктический биом как его южная граница [51], но для АЗРФ эти границы далеко не всегда совпадают. В настоящей статье применительно к Северной Евразии авторы однозначно по полевым наблюдениям и результатам анализа космических снимков разных лет отмечают активное продвижение леса в тундру. Во многих других регионах Арктики в последнее время отмечается прогрессирующий характер лесной растительности на северном пределе [37; 41]. В российской Арктике появление подростка лиственниц в тундровой зоне зафиксировано в Западной Сибири [6], на севере Восточной Сибири, а также на плато Путорана [42]. Экспансия верхней границы леса в этом регионе и изменение жизненной формы деревьев совпало со значительным увеличением летних температур и зимних осадков [26—29].

Наблюдается цикличность в появлении древесных видов и освоении ими тундрового пространства, что связано с неравномерностью климатических колебаний. Так, в междуречьях притоков реки Пур у южной границы тундровой зоны (река Хадутэ) в 1997—1999 гг. отмечался массовый подрост одно-трехлетних лиственниц, а в начале 2000-х годов они полностью исчезли после холодных зим [6].

«Позеленение» тундры как эффект увеличения площади и продуктивности кустарниковой растительности. Детальный анализ синтетической карты (см. рис. 3) показывает, что эффект «позеленения» в ряде случаев связан с изменениями в соотношении жизненных форм, доминирующих в растительном покрове. Это достигается увеличением доли кустарниковой растительности (биомассы и обилия), которое наблюдалось во многих арктических экосистемах еще в прошлом веке — на Кольском полуострове, в Большеземельской тундре, на Полярном Урале, в низкогорьях Восточной Сибири и на севере Дальнего Востока. Практически для всех систематических групп кустарников рр. *Betula*, *Salix*, *Duschekia*, *Pinus*, произрастающих в арктических и приарктических областях, позитивным фактором оказались увеличение продолжительности вегетации, рост суммы активных температур и глубины деятельного слоя в областях распространения вечной мерзлоты. В отношении механизма «позеленения» тундры (соответственно повышения запасов надземной фитомассы) возможны три варианта

«поведения»: (1) формирование нового кустарникового яруса (в дополнение к мохово-лишайниковому и травяно-кустарничковому), (2) изменение формы роста существующих кустарников — из стелющейся в пряморастущую, (3) экспансия кустарников из защищенных мест (понижений) и из мелких долин на водораздельные пространства. Суммарно все они дают эффект сравнительно быстрого роста запасов фитомассы и влияния на микроклимат, стимулирующего дальнейшее закрепление кустарников в тундре (за счет прироста, накопления опада, снегозадержания и пр.).

Сходные процессы наблюдаются и на севере Аляски (р. *Duschekia*), на западе канадской Арктики (рр. *Duschekia* и *Salix*), в канадской высокой Арктике (карликовые формы *Salix*), в Северном Квебеке (в первую очередь р. *Betula*) и в российской Арктике (рр. *Salix*, *Betula*, *Duschekia*) [35; 40; 44; 45; 47; 48]. В целом тенденция закустаривания отмечена в глобальном масштабе для многих безлесных биомов. Оно характерно не только для регионов Арктики, но наблюдается и в луговых сообществах и пастбищах других зон. Исследования, проведенные в высокоширотных горных и альпийских экосистемах, также указывают на нарастание продвижения видов ив и ольховника в горных районах Аляски, на Юконе.

В тундровой зоне в числе заметных последствий климатического потепления последних десятилетий можно отметить активизацию криогенных сложных процессов на возвышенных равнинах, сложенных суглинистыми породами морского генезиса, например на Ямале. На оползневых склонах возможно произрастание аномальных для этих широт высокоствольных ивняков [17; 25].

Ольховник (*Duschekia fruticosa*), который имеет циркумполярное распространение и доминирует среди кустарниковых видов в ряде районов Арктики, часто имеет необычное пространственное распределение в виде отдельных кустов, которые возвышаются над тундровой растительностью. Такие кустарниковые сообщества описаны в южных и типичных тундрах российской Арктики и во внутренней части горной Аляски [35]. Развитие кустарников, в свою очередь, также инициирует обратные связи, влияющие на образование ландшафтной мозаики, начиная с увеличения мощности снежного покрова, создания сплошного кустарникового покрова, уменьшения летней температуры почвы, накопления органического вещества. Это сказывается на тепловом режиме деятельного слоя почв. Обратные связи по принципу «каскадного эффекта» вызывают реакцию всех компонентов ландшафта и в итоге могут привести к процессу деградации кустарникового покрова.

Эффект «позеленения» Арктики в результате снижения покрытия лишайников («делихенизация») и увеличение доли осок и злаков в напочвенном покрове. При детальном анализе содержания рис. 3 четко прослеживаются два направления

трендов сокращения покрытия мхов и лишайников и «олуговения» (роста доли злаков и осок) тундры; в некоторых регионах они связаны с пожарами (Ямал, Чукотка), чрезмерным выпасом домашних оленей (восточный Ямал), механическими нарушениями покрова (западный и центральный Ямал), закустариванием тундры и затенением нижних ярусов растительности (полярный Урал, арктическое побережье Якутии), с периодическими подъемами численности леммингов, нарушающими напочвенный покров. Но, по-видимому, первичные причины лежат в поведении криолитосферы в условиях потепления климата Арктики. Климатогенные изменения растительности в данном случае не ограничиваются изменением прироста растений, соотношения экобиоморф и состава арктических сообществ и их продуктивности [33]. Насколько широко распространена «делихенизация» тундр и деградация мохового покрова, можно судить по ситуации на центральном Ямале, где за счет перевыпаса и механического разрушения еще в 1990-х годах около 5 млн га пастбищ домашнего оленя были деградированы. В. Н. Андреев [1] первым описал прямую связь делихенизации с интенсивным выпасом оленей и последующим олуговением тундры в районах европейского Севера, а затем и в Якутии. Для современного этапа потепления климата это подтверждает и В. Н. Карпов [8], который проследил динамику растительности деградированных тундровых пастбищ Якутии и показал, что изменения, происходящие в растительном покрове пастбищ под влиянием выпаса (смена лишайниковой растительности травяно-кустарниковой или кустарничково-зеленомошной), приводят к изменению хозяйственного запаса оленьих кормов и пересмотру сезонной принадлежности пастбищ. Вполне логичным представляется и вывод о росте дефицита зимних пастбищ как дикого, так и домашнего оленя.

Кроме того, лишайниковые покровы имеют иные, чем моховой, травяной и кустарничковый покровы, характеристики теплопроводности и в меньшей степени способны к теплоизоляции многолетнемерзлых грунтов [24]. В соответствии с этим в условиях роста температуры приземного слоя воздуха, увеличения мощности снежного покрова и продолжительности вегетационного периода в Арктике именно лишайниковые тундры становятся мишенями климатогенных перестроек и замещаются травяными, кустарничковыми и кустарниковыми сообществами.

Современные оценки трендов продуктивности арктических и приарктических ландшафтов российской Арктики. Наши данные (см. рис. 1—3) подтверждают выявившиеся ранее на локальном и региональном уровнях тренды роста продуктивности зональной растительности в условиях потепления климата, а также как реакции на нарушения целостности растительного покрова. Но ни в масштабах всей Арктики [32], ни применительно к арктическим регионам Северной Евразии [33; 21; 22] сопоставление потерь запасов и продукции фитомассы

в результате антропогенной трансформации и их роста вследствие потепления и формирования новых местообитаний не проводилось. Косвенные оценки продуктивности тундр через измерение запасов и эмиссии углерода в тундровых экосистемах делались в конце XX в. [31; 21; 22]. Понятно, что увеличение минерализации органических соединений, образования CO₂ и минеральных соединений азота при росте активных температур вегетационного периода возможно в тундрах далеко не повсеместно, а преимущественно для экосистем с высокой долей участия в покрове травянистой растительности. Это позволяет предположить, что возможный механизм увеличения продуктивности растений при потеплении климата в тундрах связан с интенсификацией активности микроорганизмов в почве и ростом доступности биогенов для растений. Пик роста продуктивности тундровых ландшафтов пришелся на конец 1990-х — начало 2000-х годов и проявлялся не столько в увеличении прироста растительного покрова *in-situ*, сколько во *внутриландшафтном перераспределении растительности и расширении площади более продуктивных типов*: на границе леса и в южных тундрах — лесных и кустарниковых, в типичных тундрах — кустарниковых и травяных, в арктических тундрах — кустарничковых и травяных (злаковых).

Для выявления возможных трендов биологической продуктивности выделенных типов ландшафтного покрова нами был проведен анализ продукта «Yearly Gross productivity», рассчитанного на основе мозаик MODIS. Можно отметить, что средние показатели первичной продукции ландшафтного типа «продуктивный» за отмеченный период снизились на 6,2%, а средние показатели для «низкопродуктивного» покрова также упали, но всего на 1,1%. Однако для этих значений *еще предстоит определить долю трендовой составляющей и исключить краткосрочные колебательные процессы*, так как многие авторы, напротив, за последние десятилетия отмечают как раз рост первичной продукции. Например, по данным Второго оценочного доклада Росгидромета [4] он составляет от 0,13% до 1,02% в год от показателей начального года наблюдений (1982 г.).

Проведенный нами анализ материалов ДЗЗ подтвердил выявленные в процессе сопоставления результатов полевых исследований тренды роста продуктивности и увеличения в нем вклада травянистых растений, т. е. собственно «позеленения» тундры. За последние десятилетия выросло усредненное значение нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), отражающего степень «позеленения» территории [31], что обусловлено увеличением вегетационного периода в Арктике (рис. 4). Рост NDVI связывают с потеплением, обусловленным разрушением ледового покрова в 50-километровой зоне вдоль берега, которое происходит в районах высокоширотной Арктики. Для арктических и приарктических территорий России

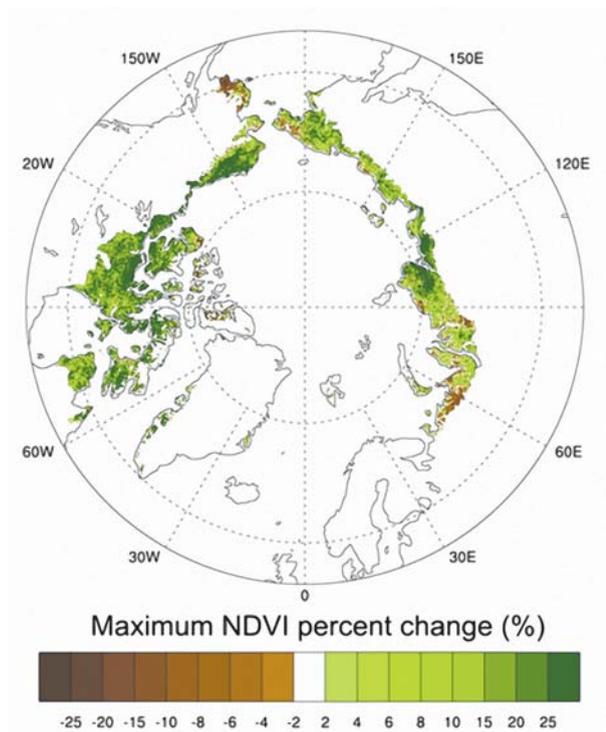


Рис. 4. Тренд изменений (%) годового значения MaxNDVI в Арктике в период с 1982 по 2012 гг., рассчитанный с помощью метода наименьших квадратов регрессии на каждый пиксель [32]

подобные оценки проведены, например, для островов Колгуев и Вайгач, где с конца 1980-х годов по настоящее время выявлено «позеленение» тундры, а рост максимальных значений NDVI составил 15% и 30% соответственно [15]. Это произошло как за счет увеличения запасов зеленой части фитомассы (трав, листьев кустарников и кустарничков), так и в результате расширения площадей более продуктивных сообществ, таких как сообщества злаков, осок и пушиц («олуговление») и ивняков («закустаривание»), хотя на циркумполярной карте изменений MaxNDVI в Арктике (см. рис. 4) для прилегающих к островам материковых территорий Большеземельской тундры отмечены отрицательные тренды MaxNDVI (–4...–6%), причем максимальные значения за последние 30 лет показаны для всей канадской Арктики и севера Аляски, а в российской Арктике — для юга Восточного Таймыра и междуручья Анабары и Оленька. Возрастание запасов и продукции зеленой фитомассы тесно коррелирует с ростом средних летних температур, увеличением продолжительности вегетационного периода (его удлинением в начале и в конце) и количеством накопленного за этот период тепла, а также с увеличением глубины деятельного слоя за счет его протаивания.

«Позеленение» тундры как результат развития травянистой растительности на антропогенно нарушенных территориях. Сопоставление данных дистанционного зондирования (см. рис. 1—3)

показало, что некоторые ареалы «продуктивных» ландшафтов сформировались в зонах нового хозяйственного освоения — в Большеземельской тундре, на Ямале, на Гыданском полуострове, на Таймыре и на севере Якутии. Подтверждением этого является формирование в последние десятилетия крупных ареалов «продуктивных» ландшафтов:

- в границах ареалов хозяйственного освоения нефтегазовых месторождений в 1970—1980-х годах в Ненецком автономном округе, в Республике Коми, в Ямало-Ненецком автономном округе (Бованенково, Харасавей, Обь-Тазовское междуручье, полуостров Тазовский, юг полуострова Гыданский);
- вокруг арктических населенных пунктов;
- вдоль крупных линейных сооружений (дорог, газо- и нефтепроводов).

Эффект повышения продуктивности в данном случае достигается снятием антропогенных нагрузок и формированием благоприятных условий (тепла, влаги, дренированности и более раннего схода снега) для развития вторичной преимущественно злаковой растительности, в том числе адвентивной [19; 20]. Интересно, что при сохранении действия антропогенного фактора (например на обширных пространствах лесотундровой растительности вокруг Норильского медно-никелевого комбината) эти процессы не наблюдаются — исходная растительность более продуктивная, чем в «техногенной пустыне».

Формирование растительности на новых (антропогенных) местообитаниях происходит в основном за счет видов интразональных сообществ, например при расширении площади произрастания вейников, пушиц, осок, злаков, среди которых много видов более южных широт.

Особые местообитания с избыточным увлажнением и доминированием представителей семейств *Superaceae*, *Equisetaceae*, *Juncaceae*, *Poaceae*, *Potamogetonaceae*, *Ranunculaceae*, *Sparganiaceae* формируются в результате криогенных просадок, роста мощности деятельного слоя при увеличении протаивания почвы и в отсутствие дренажа. Такой процесс «олуговления» тундры, связанный с механическими повреждениями лишайникового, мохового и кустарничкового покрова и появлением техногенных водоемов в местах протаивания, отмечается многими исследователями тундр [19—22; 17]. В качестве примера можно привести наблюдения одного из авторов статьи по заселению антропогенных местообитаний в районах добычи нефти в Большеземельской тундре и на севере Западной Сибири. Установлены активные миграционные потоки видов семейства осоковых из естественных местообитаний на новые, антропогенные по происхождению местообитания [18; 19].

Вполне закономерный вопрос, связанный с процессом «олуговления» тундр, касается понимания сукцессионного статуса новых сообществ, продолжительности существования и их судьбы после снятия антропогенного пресса. Во-первых, чаще всего

«отравянные тундры» — стадия дигрессии, а не сукцессии — после перевыпаса, тундрового пожара, химического и механического повреждения тундровой растительности и нарушения теплового режима почвы. Процессы восстановления таких сообществ подробно описаны [19; 20]. Сравнительно быстро эти сукцессионные процессы происходят в современных климатических условиях на дренированных участках в районах с проявлениями континентальности. Так, за 26 лет спутниковых наблюдений с использованием AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) спутников NOAA на территории Ямала изменения растительного покрова незначительны, что выглядит достаточно контрастно в сравнении с Аляской и, шире, Северной Америкой [48], где преобладает океанический климат и слабо развита многолетняя мерзлота. Во-вторых, переувлажненные участки деградируют по каскадному принципу, формируя вторичные мелководные водоемы, под которыми образуются талики. Со временем происходит их заселение гидробионтами, формируются кайма макрофитов и зональность растительности по градиенту влажности.

Тренды «олугования» на европейском Севере в последние десятилетия, несомненно, определяются распространением высокотемпературных (до -3°C) и весьма динамичных многолетнемерзлых пород [16]. Их современная деградация здесь проявляется в смещении границ распространения мерзлоты на десятки километров в последние 30 лет. В. В. Елсаков и И. О. Марущак [7] показали, что основные изменения криолитозоны территории европейского Севера, оцениваемые по интенсивности дренирования термокарстовых озер для участков прерывистого и островного расположения мерзлоты, приходятся на 1973—1988 гг. (от 60% до 80% всех изменений). Для районов сплошного залегания мерзлоты общий тренд

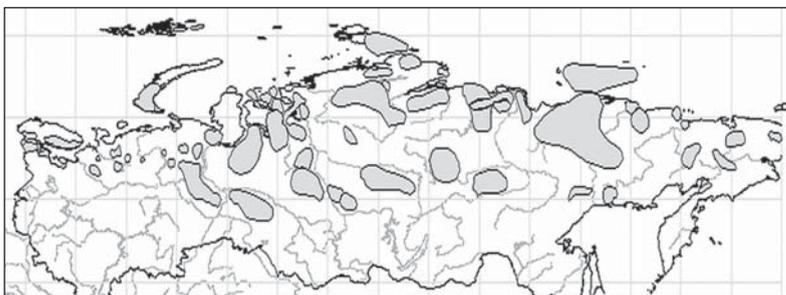


Рис. 5. Современный ареал дикого северного оленя в границах арктических и приарктических территорий северной Евразии [5]

изменений смещен во времени и связан с 1988—2002 гг. Период после 2000 и до 2007 г. был относительно устойчивым. Можно предположить, что в последние годы потепление стало влиять на растительность не столь радикально.

Некоторые современные тренды развития биоты и их последствия на фоне «позеленения» тундры. Очевидно, что ответ растительности на абиотические изменения в Арктике не ограничивается изменением индивидуального роста растений и состава арктических сообществ. Например, упомянутая выше экспансия кустарников и деревьев способствует аккумуляции снега, увеличению зимних почвенных температур, повышению микробной активности почвы и соответственно накоплению питательных веществ в почве, что стимулирует дальнейший рост древесно-кустарникового покрова. Ответы растительности на изменения климата могут быть более сложными, чем полученные при экспериментах, имитирующих потепление. Каскадный, кумулятивный и синергетический эффект влияния изменений климата и антропогенной трансформации выражается в трендах продуктивности экосистем Арктики, а они, в свою очередь, влияют и на формирование других трендов биоты (пример: фрагментация и «очаговый» характер ареала дикого северного оленя — см. рис. 5), современные тренды в распространении и динамике численности некоторых групп водоплавающих птиц Арктики [34]. За последние два десятилетия произошел существенный рост численности белошекой казарки, белолобого гуся, черной казарки (в азиатской части), краснозобой казарки, малого лебедя, пискульки и других видов, кормовой базой которых является травянистая растительность.

Выводы

Подводя итоги проведенного анализа, можно суммировать его результаты:

1. Эффект «позеленения» арктических и приарктических территорий Российской Федерации (повышения продуктивности растительности и расширения площадей, занятых более продуктивными растительными сообществами) может быть оценен путем сравнения разногодичных данных дистанционного зондирования и трендов NDVI (см. рис. 4).

2. За последние десятилетия для всей Арктики и большей части арктических регионов северной Евразии отмечено увеличение значений NDVI (продуктивности ландшафта), т. е. «позеленение» тундры, которое проявляется через рост проективного покрытия и обилия деревьев, кустарников, осок и злаков за счет снижения проективного покрытия мохообразных и лишайников («делихенизация») и развития в трансформированных сообществах яруса травянистых растений. Применяемые в настоящей работе методы ДЗЗ и анализа результатов их применения позволяют выявить и снижение продуктивности ландшафтов, которые на ранних стадиях сукцессии имеют низкие запасы фитомассы.

3. Суммарно прирост площади «продуктивного» ландшафтного покрова (собственно «позеленения» тундры) с 2000 по 2014 гг. на исследованных территориях (см. рис. 3) составил 3 074 328 км², тогда как деградация ландшафта, замена продуктивных растительных сообществ менее продуктивными за счет кумулятивного эффекта — 3 140 687 км². Таким образом, можно сказать, что процессы «позеленения» и процессы деградации, по-видимому, компенсируют друг друга в абсолютных показателях, однако наблюдается их значительная пространственная дифференциация.

4. Из-за относительной молодости арктических и приарктических территорий и высокой роли абиотических факторов, действующих на биоту и экосистемы сильнее, чем внутриценотические факторы, любые природные (в том числе климатические) и антропогенные воздействия приводят к более глубоким, чем в южных регионах, трансформациям ландшафтов. Филогенез в Арктике редуцирован, а синергизм в действиях природных и антропогенных факторов может не только необратимо нарушить его ход, но и привести к формированию покровов из длительноживущих полуприродных, низкопродуктивных и «малонаселенных» (с низким биоразнообразием) ландшафтов. Показано, что *определение текущих трендов состояния ландшафтов* и оценка перспектив их разномасштабных, разновременных и разнонаправленных изменений возможны с использованием дистанционных методов и таких интегральных показателей состояния ландшафта, как их продуктивность.

Работа выполнена в рамках проекта «Биогеографические последствия современных природных и антропогенных воздействий на биоту, биологические ресурсы и ландшафты российской Арктики» программы Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации» 2014—2015 гг. и гранта РФФИ № 14-05-31310.

Литература

1. Андреев В. Н. Геоботаническое исследование тундровых оленьих пастбищ // Сов. Север. — 1930. — 5. — С. 101—113.
2. Андреев В. Н. Методика геоботанических работ при землеустройстве оленьих пастбищ Крайнего Севера. — М.; Л.: Сельхозгиз, 1956. — 100 с.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Техническое резюме. — М.: Росгидромет, 2014. — 93 с.
4. Данилкин А. А. Динамика населения диких копытных России: гипотезы, факторы, закономерности. — М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2009. — 310 с.
5. Дроздов Д. С., Украинцева Н. Г., Царев А. М., Черыгина С. Н. Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории

Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974—2008) // Криосфера Земли. — 2010. — Т. 14, № 1. — С. 22—31.

6. Елсанов В. В., Марущак И. О. Межгодовые изменения термокарстовых озер Северо-Востока Европейской России // Исследования Земли из космоса. — 2011. — № 5. — С. 45—57.
7. Карпов Н. С. Динамика растительности оленьих пастбищ тундровой зоны Северо-Востока Якутии: Дис. ... д-ра биол. наук / Ин-т биол. проблем криолитозоны СО РАН. — Якутск, 2006. — 369 с.
8. Карта растительности СССР: 1:4 000 000. — М.; Л., 1980.
9. Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 2 (6). — С. 66—78.
10. Крючков В. В. Агролесомелиорация тундры. — М.: Лесная пром-сть, 1978. — 168 с.
11. Козлов Д. Н., Пузаченко М. Ю., Федяева М. В., Пузаченко Ю. Г. Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2008. — № 4. — С. 112—124.
12. Кренке-мл. А. Н. Отображение факторов формирования компонентов ландшафта на основе тематических карт, дистанционной информации и трехмерной модели рельефа: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Ин-т географии РАН. — М., 2011. — 27 с.
13. Лавриненко О. В., Лавриненко И. А. Островные ельники восточно-европейских тундр // Ботан. журн. — 2003. — Т. 88, № 8. — С. 59—77.
14. Лавриненко И. А., Лавриненко О. В. Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря // Тр. Карел. науч. центра РАН. — 2013. — Вып. 6. — С. 5—16.
15. Оберман Н. Г. Глобальное потепление и изменение криолитозоны Печоро-Уральского региона // Разведка и охрана недр. — 2007. — № 4. — С. 63—68.
16. Ребристая О. В., Хитун О. В., Чернядьева И. В., Лейбман М. О. Динамика растительности на криогенных оползнях в центральной части полуострова Ямал // Ботан. журн. — 1995. — Т. 80, № 4. — С. 31—48.
17. Телятников М. Ю., Пристяжнюк С. А. Растительный покров как индикатор изменений климата в субатлантическую фазу голоцена (на примере субарктических тундр полуострова Ямала) // Сиб. экол. журн. — 2002. — Т. 9, № 4. — С. 461—472.
18. Тишков А. А. Экологическая реставрация нарушенных экосистем Севера. — М.: Рос. акад. образования, 1996. — 125 с.
19. Тишков А. А. Антропогенная трансформация флоры и экологическая политика на Севере // Флора антропогенных местообитаний Севера. — М.: Ин-т географии РАН, 1996. — С. 5—15.
20. Тишков А. А. Продуктивность и баланс углерода природных экосистем России // Бюл.

- «Использование и охрана природных ресурсов в России». — 2005. — № 1. — С. 74—90.
21. Тишков А. А. Биосферные функции природных экосистем России. — М.: Наука, 2005. — 308 с.
22. Тишков А. А. Теория и практика сохранения биоразнообразия (к методологии охраны живой природы в России) // Бюл. «Использование и охрана природных ресурсов в России». — 2006. — № 1 (85). — С. 77—97.
23. Тишков А. А., Осокин Н. И., Сосновский А. В. Влияние синузильных мохообразных на деятельный слой арктических почв // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2013. — № 3. — С. 39—47.
24. 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.
25. Шишконокова Е. А., Аветов Н. А., Алексеев Ю. Е., Шведчинова Н. К. Экология представителей семейства осоковых (*Suregaceae*) в нарушенных местообитаниях в районах добычи нефти на севере Западной Сибири // Бюл. МОИП, отд. биол. — Т. 119, № 4. — С. 70—80.
26. Шиятов С. Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. — Екатеринбург: УрО РАН, 2009. — 219 с.
27. Шиятов С. Г., Мазепа В. С., Чехлов О. Ю. Изменения климата и динамика лесотундровых экосистем на Полярном Урале в XX столетии // Науч. вестн. — 2002. — Вып. 11. — С. 28—35.
28. Шиятов С. Г., Терентьев М. М., Фомин В. В. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. — 2005. — № 2. — С. 1—8.
29. Шиятов С. Г., Мазепа В. С. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале // Лесоведение. — 2007. — № 6. — С. 11—22.
30. Честных О. В., Замолодчиков Д. Г., Карелин Д. В. Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем // Экология. — 1999. — № 6. — С. 426—432.
31. Bhatt U. S., Walker D. A., Reynolds M. K. et al. Recent declines in warming and arctic vegetation greening trends over pan-Arctic tundra // Remote Sens (Special NDVI3g Issue). — 2013. — № 5. — P. 4229—4254.
32. Bazilevich N. I., Tishkov A. A. Live and dead reserves and primary production in polar desert, tundra and forest tundra of the former Soviet Union // Ecosystems of the world 3. Polar and alpine tundra / Ed. F. E. Wielgolaski. — Amsterdam; Lausanne; New York; Oxford; Shannon; Singapore; Tokyo: Elsevier publ., 1997. — P. 509—539.
33. CAFF (Conservation of Arctic Flora and Fauna): Arctic Biodiversity Trends 2010 — Selected indicators of change / CAFF Intern. Secretariat. — Akureyri, Iceland, May 2010.
34. Chapin F. S. III, McGraw J. B., Shaver G. R. Competition causes regular spacing of alder in Alaskan shrub tundra // Oecologia. — 1989. — Vol. 79. — P. 412—416.
35. Chapin F. S. III, Bret-Harte M. S., Hobbie S. E., Zhong H. Plant functional types as predictors of transient responses of arctic vegetation to global change // J. of Vegetation Science. — 1996. — Vol. 7. — P. 347—358.
36. Danby R. K., Hik D. S. Variability, contingency and rapid change in recent subarctic alpine tree line dynamics // J. of Ecology. — 2007. — Vol. 95. — P. 352—363.
37. Elmendorf S. C., Henry G. H. R., Hollister R. D. et al. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time // Ecology Letters. — 2012. — Vol. 15. — P. 164—175.
38. Forbes B. C., Fauria M. M., Zetterberg P. Russian arctic warming and 'greening' are closely tracked by tundra shrub willows // Global Change Biology. — 2010. — 16. — P. 1542—1554.
39. Harsch M. A., Hulme P. E., McGlone M. S., Duncan R. P. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming // Ecology Letters. — 2009. — 12 (10). — P. 1040—1049.
40. Kirdeyanov A. V., Hagedorn F., Knorre A. A. 20th century tree-line advance and vegetation changes along an altitudinal transect in the Putorana Mountains, northern Siberia // Boreas. — 2012. — Vol. 41. — P. 56—67.
41. Puzachenko Y., Sandlerky R., Sankovski A. Methods of evaluating thermodynamic properties of landscape cover using multispectral reflected radiation measurements by the Landsat satellite // Entropy. — 2013. — Vol. 15. — P. 3970—3982.
42. Sandlerky R., Puzachenko Y. G. Dynamic of landscape energetic characteristics based on remote sensing data // The Problems of Landscape Ecol. — 2011. — Vol. 333. — P. 125—132.
43. Serebryanny L. R., Tishkov A. A. Quaternary environmental changes and ecosystems of the European Arctic // Ecological Studies. — 1998. — Vol. 124: Global Changes and Arctic Terrestrial Ecosystems. — P. 47—62.
44. Sturm M., Racine C. H., Tape K. D. Increasing shrub abundance in the Arctic // Nature. — 2001. — 411. — P. 546—547.
45. Tape K., Sturm M., Racine C. The evidence for shrub expansion in northern Alaska and the Pan-Arctic // Global Change Biology. — 2006. — № 12. — P. 686—702.
46. Tishkov A. A. The secondary successions in arctic ecosystems in relation to tundra restoration // Disturbance and recovery of tundra ecosystems / R. M. M. Crawford (ed.). — Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1998. — P. 573—583.
47. Tishkov A. Conservation of biodiversity in Russia // Geography. Environment. Sustainability. — 2014. — № 3. — P. 125—136.
48. Walker D. A., Reynolds M. K., Daniëls F. J. A. et al. The Circumpolar Arctic vegetation map // J. of Vegetation Science. — 2005. — Vol. 16. — P. 267—282.