

«ПОЗЕЛЕНЕНИЕ» ЛАНДШАФТОВ АРКТИКИ КАК СЛЕДСТВИЕ СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТОГЕННЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ТРЕНДОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

**© А. А. ТИШКОВ,¹ Е. А. БЕЛОНОВСКАЯ, М. А. ВАЙСФЕЛЬД,
П. М. ГЛАЗОВ, А. Н. КРЕНКЕ-мл., О. В. МОРОЗОВА, И. В. ПОКРОВСКАЯ,
Н. Г. ЦАРЕВСКАЯ, Г. М. ТЕРТИЦКИЙ**

Институт географии РАН, Москва
E-mail: ¹ tishkov@biodat.ru

Получены результаты сопоставления единовременных обзорных оценок трансформации растительного покрова суши Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и прилегающих территорий (лесотундры и редколесий) и трендов их продуктивности с помощью дистанционных методов (сенсор Modis 2000 и 2014 гг. с разрешением 2×2 км). Это позволило выявить разномасштабные, разновременные и разнонаправленные изменения ландшафтов в условиях синергизма действий меняющегося климата и расширяющейся хозяйственной деятельности. Показано, что на современном этапе наблюдаются одновременно процессы роста продуктивности («позеленение») и антропогенной трансформации, ее снижение за счет очаговых и фронтальных техногенных нарушений растительного покрова. Прослежены механизмы реакции растительности, выявляемые наземными и дистанционными наблюдениями, — движение на север границы леса, «закустаривание», «олугование» и «делихенизация» тундры. Сделан вывод о необратимости некоторых изменений и росте площадей территорий с дестабилизированным состоянием биоты.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, растительный покров, биологическая продуктивность, вегетационный индекс NDVI, северная граница леса, «позеленение», «закустаривание», «олугование» и «делихенизация» тундры, тренды биоты.

Согласно данным Второго оценочного доклада Росгидромета об изменениях климата, темпы потепления Северной Евразии составляют в последние десятилетия и на ближайшую перспективу около $0.43^\circ\text{C}/10$ лет [2]. Непосредственно для Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ)¹ и прилегающих территорий, отнесенных к регионам, наиболее уязвимым в отношении изменений климата, эти темпы еще выше. Глубокие изменения в арктических экосистемах под влиянием климата выявлены для всей циркумполярной Арктики [12, 23], ее североамериканского сектора [21], а также Российской Арктики [3, 6, 10, 15]. Данные дистанционного зондирования (ДДЗ) Арктики свидетельствуют о росте в последние десятилетия *усредненного значения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI)* («позеленения»), связанного с ростом первичной продукции в условиях увеличения продолжительности вегетационного периода, изменения теплового режима почв и многолетнемерзлых грунтов и большей доступности для растений питательных веществ.

В рамках проекта «Биогеографические последствия современных природных и антропогенных воздействий на биоту Российской Арктики» программы фундаментальных исследований президиума РАН в 2014—2015 гг. был проведен анализ масштабных изменений продуктивности арктических и приарктических ландшафтов России в период с 2000 по 2014 г. и трендов их

¹ Арктическая зона Российской Федерации, согласно нормативным документам, — часть Арктики, на которую распространяется юрисдикция РФ. Состав сухопутных территорий АЗРФ определен Указом Президента РФ от 2 мая 2014 г. № 296 «О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации».

биоты, обусловленных этими изменениями. С помощью ДДЗ и полевых исследований выявлены особенности современной динамики растительности, численности и распространения некоторых групп арктических млекопитающих и птиц.

Ранее международная группа специалистов проанализировала данные космической съемки с 1982 по 2008 г. и установила, что в высоких широтах Канадской Арктики, Северной Аляски, Северной Евразии рост максимальных значений NDVI достигает 15 % и выше [23]. Увеличение NDVI для рассматриваемых регионов авторы связывают с потеплением, которое вызывает разрушение многолетнего ледового покрова в 50-километровой прибрежной зоне Ледовитого океана. Тенденции, выявленные при анализе спутниковых данных, были подтверждены одновременно наземными исследованиями изменений тундровой растительности на модельных площадках в рамках международных проектов — ITEX (International Tundra Experiment) и BTF (Back to the Future). В течение последних 25—30 лет наиболее заметные изменения, в том числе возрастание первичной продукции, смена жизненных форм растений тундр и рост обилия доминирующих видов растений, произошли именно в высокоширотной Арктике. Эти изменения, по мнению исследователей, стали ответом на повышение глобальной температуры и соответствующие процессы в многолетнемерзлых породах. Ранее для АЗРФ на эти закономерности было обращено внимание Н. И. Базилевич и А. А. Тишковым [13] при анализе продуктивности тундр Евразии.

Методика исследований. «Позеленение» Арктики — эффект, наблюдаемый при сравнительном анализе данных NDVI и спектральных космических снимков, связанный с ростом проективного покрытия и продуктивности растительности. Это явление последних десятилетий может быть эффективно оценено путем сравнения разнгодичных ДДЗ. С середины 1980-х гг. накоплен архив материалов дистанционных измерений состояния ландшафтов Арктики. В нашей статье использовались данные сенсора Modis—космические снимки с разрешением 2×2 км 2000 и 2014 гг., позволяющие единовременно охватить российский сектор территорий, примыкающих к Северному Ледовитому океану. Диапазон спектральных каналов данного сенсора был подобран специально для оценки состояний растительности, а разрешение снимков позволяло оперативно обрабатывать информацию по большим территориям с необходимой повторяемостью измерений [19, 20]. Нами предложен подход к выявлению трендов арктических ландшафтов на основе сравнения рядов данных ДДЗ. Состояния тундровой растительности («ландшафтного покрова») условно разделены на 2 типа: 1) **«продуктивные»** — характеризуются усложнением в наземной сфере за счет формирования новых ярусов и увеличением проективного покрытия более продуктивных видов растений (кустарников, осок, злаков, разнотравья); 2) **«низкопродуктивные»** — с низкими показателями проективного покрытия, отсутствием древесной и кустарниковой растительности, частыми антропогенными трансформациями, преобладанием мохово-лишайниковых покровов, болот. Предложенными методами определялись пространственные изменения продуктивности растительности по двум условно выделенным состояниям.

Алгоритм работы был следующий. Анализ и синтез проводились в два этапа: 1) составление ландшафтной схемы АЗРФ, анализируемой с помощью методов анализа ДДЗ и с разбиением на «продуктивные» и «низкопродуктивные» состояния; 2) сравнение изменений в состоянии ландшафтов 2000 и

2014 гг. и выделение территорий с трендами увеличения или уменьшения продуктивности.

Первый этап выполнялся по технологии актуализации тематических карт на основе дистанционной информации [5]. Данная технология базируется на том, что мультиспектральная отраженная радиация несет в себе информацию о процессах преобразования солнечной энергии ландшафтом с определенной растительностью, почвенно-геохимическими условиями и увлажнением в конкретной точке (пикселе). Свойства растительности и почв могут описываться как функции формы земной поверхности (количественно через трехмерную модель рельефа). Получаемая модель статистически значимо воспроизводится через мультиспектральную космическую информацию. По полученным зависимостям обосновывается алгоритм интерполяции состояний объекта на всю территорию, и получается карта актуализированного состояния ландшафта.

В нашей работе это воспроизведение осуществлялось 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.

Суть применения дискриминантного анализа в данной работе заключается в построении линейных функций, связывающих исходные дискретные состояния растительности и набор независимых переменных, и в последующей «проверке» исходного расположения состояний исследуемого явления. Эти функции строятся таким образом, чтобы разница между дискриминируемыми состояниями получалась максимальной при их отображении на векторное пространство, составленное из этих функций. Иными словами, данная операция трансформирует исходное пространство переменных в более «репрезентативное» относительно исследуемого явления. По условию задачи каждому дискретному состоянию соответствует множество «проб» (в нашем случае это пиксели дистанционной информации, которым на тематической карте соответствует тот или иной тип ландшафта). Вместе эти пробы формируют обобщенные «образы» каждого дискретного состояния. В ходе дискриминации каждая проба соотносится с этими обобщенными образами, а отношения нормированных дистанций от образов к пробе дают вероятность отнесения пробы к каждому из классов состояний. Таким образом, у каждого класса есть вероятностное поле. Количество проб, исходные и переопределенные состояния которых совпали, дает возможность оценить устойчивость распознавания. В нашем случае более 90 % проб совпали для обоих сроков, что говорит об уверенном распознавании исходных состояний. Методика подробно изложена в работах А. Н. Кренке и Ю. Г. Пузаченко [4, 5, 19, 20].

Используя дискриминантный анализ, построены «вероятностные поля», определяющие для каждого дискретного состояния достоверность его встречаемости на каждом участке реального пространства. В нашем случае мы распознавали всего два состояния ландшафтного покрова: «продуктивное» (выше средних значений) и «низкопродуктивное» (ниже средних значений). Качество распознавания на космических снимках составило более 0.9 для каждого срока (2000 и 2014 гг.). В результате было получено достоверное отображение распределения рассматриваемых состояний растительности и их трансформации с 2000 по 2014 г. (см. рисунок). При этом установлено, что

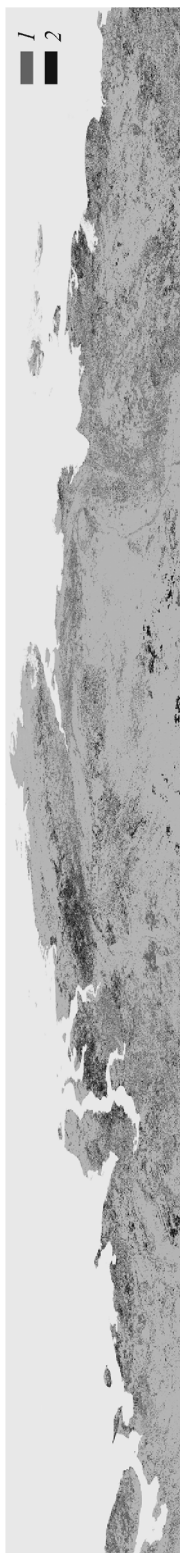
ландшафты, которые демонстрируют заметный рост продуктивности, и те, у которых наблюдается ее падение, могут быть отнесены к категории *дестабилизированных*.

Результаты исследований. Эффект «позеленения» арктических и приарктических территорий. Пространственное совмещение карт 2000 и 2014 гг. позволило определить участки перехода одного состояния ландшафта в другой (см. рисунок). Суммарно изменениями (повышением продуктивности растительности) были охвачены площади 307 432.8 км², тогда как ландшафты с тенденцией снижения продуктивности растительности (в том числе на территориях с интенсивным выпасом домашних оленей, пожарами, механическими нарушениями, химическим загрязнением и пр.) нарастающим итогом составили 314 068.7 км², т. е. *дестабилизирующими процессами охвачены площади, сопоставимые с площадью тундровой и лесотундровой зон (по разным оценкам 3.1—3.5 млн км²) и прилегающих к ним редколесий*. Можно заключить, что процессы «позеленения» и деградации ландшафта в границах рассматриваемых территорий в последние два десятилетия по площади проявления компенсируют друг друга, но наблюдаются их пространственная дифференциация (см. рисунок), полимасштабность и разнофакторность. Последняя выявляется в том числе полевыми наблюдениями.

«Позеленение» южных тундр как следствие продвижения границы леса на север. На рисунке выявлены приарктические территории (полоса относительного безлесья на севере Евразии), которые в первое десятилетие XXI в. стали более продуктивными, в том числе за счет активного продвижения границы леса на север. Можно констатировать: 1) восстановление древесной и кустарниковой растительности в Хибинах (на территориях, где растительность деградировала под действием выбросов Мончегорского комбината); 2) формирование древесно-кустарниковых покровов вдоль побережья Чешской губы и в Малоземельской тундре; 3) расширение очагов лесной растительности в низовьях р. Печора; 4) появление новых участков леса и кустарниковых зарослей в долинах рек и на склонах Полярного Урала и на юге п-ова Ямал; 5) расширение лесных островов на Восточном Таймыре (Ары-Мас и др.); 6) продвижение на север древесно-кустарниковой растительности в низовьях Анабара, Оленёка, Лены, Яны и Индигирки.

Общий тренд продвижения границы предтундровых редколесий к северу в Евразии составил за последние 30 лет 10—30 км [18]. Появление массового подроста лиственниц в тундре отмечено в Западной Сибири, на севере Восточной Сибири, а также на плато Путорана, но оно, как отмечают авторы, циклично (в соответствии с циклами климата и поведением криосферы) [18].

Расширение площади кустарников в тундрах. Детальный анализ рисунка и результаты полевых наблюдений показывают, что эффект «позеленения» АЗРФ в ряде случаев связан с увеличением доли кустарников в растительном покрове, которое наблюдается в XXI в. на Кольском полуострове, в Большеземельской тундре, на Полярном Урале, в низкогорьях Восточной Сибири и на севере Дальнего Востока. Практически для всех родов тундровых кустарников и стлаников (из родов *Betula*, *Salix*, *Duschekia*, *Pinus*), произрастающих в арктических и приарктических областях, позитивным фактором для роста оказалось увеличение периода вегетации, суммы активных температур и глубины сезонного протаивания мерзлоты. Возможны три механизма усложнения вертикальной структуры сообществ, приводящие к «позеленению» тундры (и соответственно повышению запасов надземной фитомассы):



1) формирование *in situ* нового (кустарникового) яруса (кустарниковых тундр на месте кустарничковых, моховых и мохово-лишайниковых); 2) изменение формы роста существующих зарослей кустарников — из стелющихся в пряморастущие; 3) экспансия кустарников из защищенных понижений (долин рек и ручьев, оврагов) на водораздельные пространства. Суммарно эти процессы дают эффект повышения проективного покрытия кустарников, сравнительно быстрого роста фитомассы и влияния на микроклимат (накопление снега, повышение приземных температур воздуха и пр.), стимулирующего дальнейшее закрепление кустарников в тундре. Сходные процессы выявлены на Аляске, в Канадской Арктике и других регионах Российской Арктики [15, 21, 22].

«Делихенизация» и «олугование» тундр. Полевые наблюдения и анализ ДДЗ позволили выявить разные процессы в динамике арктической растительности, сопровождающиеся сокращением покрытия мхов и лишайников и «олугованием» тундр (ростом доли злаков, осок и разнотравья): 1) послепожарные сукцессии (Ямал, Чукотка); 2) последствия перевыпаса домашних оленей (Восточный Ямал); 3) механические нарушения растительного покрова (Западный и Центральный Ямал); 4) закустаривание тундры и затенение нижних ярусов растительности (Полярный Урал, арктическое побережье Якутии); 5) деградация растительности под воздействием атмосферных загрязнений (Кольский полуостров, Западный Таймыр); 6) ранее отмеченные нарушения растительности вследствие роста численности леммингов и воздействия скоплений водоплавающих птиц. Все эти процессы приводят к «позеленению» тундр за счет их «олугования», хотя часто первичные причины лежат в поведении многолетней мерзлоты в условиях потепления климата.

Известно, что лишайники имеют иные, чем моховой, травяной, кустарничковый покровы, характеристики теплопроводности и в меньшей степени способны к теплоизоляции многолетнемерзлых грунтов [11]. В соответствии с этим в условиях роста температуры приземного слоя, снежного покрова и продолжительности вегетационного периода в арктических и приарктических районах лишайниковые тундры становятся «мишенями» климатогенных перестроек и замещаются травяными и кустарничковыми сообществами.

Тренды продуктивности арктических и приарктических ландшафтов. Наши данные (см. рисунок) подтверж-

Новые «продуктивные» (1) и «низкопродуктивные» (2) состояния растительности арктических и приарктических территорий России, выявленные при сопоставлении данных дистанционного зондирования сенсора MODIS 2000 и 2014 гг.

дают выявленные ранее на локальном и региональном уровнях тренды роста продуктивности зональной растительности как следствие потепления климата и как реакцию на механические нарушения растительного покрова. Данные о потерях запасов и продукции фитомассы в результате антропогенной трансформации и их росте в результате потепления и формирования новых местообитаний в масштабах всей Арктики и применительно к АЗРФ немногочисленны [7, 12, 13]. Увеличение интенсивности минерализации органических соединений, образования CO_2 и минеральных соединений азота при росте активных температур вегетационного периода идет в тундрах далеко не повсеместно, а преимущественно в ландшафтах с высокой долей травянистой растительности. Это позволяет предположить, что возможный механизм роста продуктивности в АЗРФ связан с интенсификацией активности почвенных микроорганизмов и ростом доступности биогенов для растений. Пик этого роста пришелся на начало 2000-х гг. и проявлялся не столько в увеличении прироста растений *in situ*, сколько во внутриландшафтном перераспределении (усилении роли) более продуктивных типов растительности: на границе лесотундры и южных тундр — лесов и высокоствольных кустарников, в типичных тундрах — кустарниковых и травяных сообществ, в арктических тундрах — травяных сообществ.

Проведенный анализ ДДЗ подтвердил выявленные тренды роста продуктивности. За последние десятилетия выросло усредненное значение вегетационного индекса NDVI, отражающего «позеленение» тундр, — в диапазоне от 15 до 30 % [10, 12].

«Позеленение» тундры как следствие развития травянистой растительности на антропогенно нарушенных территориях. Анализ ДДЗ (см. рисунок) показал, что некоторые ареалы «продуктивных» ландшафтов АЗРФ сформировались в областях нового хозяйственного освоения в Большеземельской тундре, на Ямале, Гыдане, на Западном Таймыре и на севере Якутии: в границах нефтегазовых месторождений, арктических населенных пунктов, вдоль крупных линейных сооружений. Эффект повышения продуктивности растительности здесь достигается снятием техногенных нагрузок и формированием благоприятных условий для развития вторичной, преимущественно злаковой, растительности [7]. Особые арктические сообщества с доминированием представителей семейств *Cyperaceae*, *Equisetaceae*, *Juncaceae*, *Poaceae*, *Potamogetonaceae*, *Sparganiaceae* формируются в результате криогенных процессов и «олугования» при механическом разрушении почвенно-растительного покрова и появлении техногенных водоемов и должны стать предметом специальных исследований [7–9].

Закключение и выводы. Очевидно, что ответная реакция растительности на абиотические изменения в арктических и приарктических регионах России не ограничивается изменением роста растений и состава сообществ. Например, экспансия кустарников и деревьев в тундру способствует аккумуляции снега, увеличению зимних температур почвы, повышению микробной активности почвы и соответственно накоплению питательных веществ в почве, что в свою очередь стимулирует дальнейшее развитие древесно-кустарникового покрова. Отклики растительности на изменения климата могут быть более сложными, чем те, которые получены при экспериментах, имитирующих потепление.

Синергетический эффект влияния изменений климата и антропогенной трансформации проявляется и в других реакциях биоты, в первую очередь в

состоянии популяций животных, связанных с растительностью. Перечислим конспективно некоторые из выявляемых трендов, наиболее ярко отражающих суть «каскадного» и кумулятивного воздействия «позеленения» тундры на фауну АЗРФ:

— изменения в характере динамики численности леммингов; исчезновение в ряде тундровых регионов ранее выраженной цикличности численности [16, 17], характерной для большинства популяций норвежского, копытного и сибирского леммингов;

— фрагментация ранее сплошного ареала дикого северного оленя и формирование «очагов» обитания его «микропопуляций»; лимитирующим фактором в данном случае выступает трансформация зимних пастбищ, в том числе за счет «делихенизации»;

— расширение ареала некоторых бореальных видов млекопитающих (бурый медведь, рысь) и птиц на север, сокращение летнего ареала песца;

— современные разнонаправленные тренды в распространении и динамике численности некоторых групп водоплавающих птиц Арктики; например, за последние два десятилетия произошел рост численности белошекой казарки, белолобого гуся, черной казарки (в азиатской части ареала), краснозобой казарки, малого лебедя и других видов, кормовой базой которых является травянистая растительность;

— наблюдаемые в последние десятилетия в западной части ареала рост численности видов гусеобразных (кроме гуся-пискульки) и снижение численности уток, связанные с эффектом «позеленения» тундр: основу питания гусей составляют зеленые части однодольных растений, участие которых в растительном покрове растет; практически все виды арктических уток питаются в море в основном животными кормами, численность птиц зависит от состояния кормовой базы и интенсивности воздействия хищников, которые из-за отсутствия циклов у леммингов интенсивнее стали разорять гнезда уток.

Суммируем результаты проведенного анализа.

Во-первых, если раньше в отношении Российской Арктики бытовало мнение, что доля нарушенных территорий едва достигает 1—2 %, то сейчас можно говорить о *повсеместности трансформации ландшафта*.

Во-вторых, сам факт масштабных перестроек, происходящих в наземных экосистемах тундровой зоны, подтверждает тезис о наступлении новой эпохи в развитии природы Земли и непосредственно арктических и приарктических территорий Евразии — *антропоцена* [11, 14].

В-третьих, география, как наука синтетическая и ориентированная на обязательную гуманитарную составляющую в исследованиях, получает по сути дела новый актуализированный объект исследований [8, 9], для оценки динамики которого необходима новая методологическая база.

В-четвертых, за рассмотренный период 2000—2014 гг. для ландшафтов арктических и приарктических регионов Евразии отмечено «позеленение», индицируемое увеличением значений NDVI. Оно проявляется через рост проективного покрытия и обилия растений разных жизненных форм (деревьев, кустарников, трав) за счет снижения проективного покрытия мохообразных и лишайников («делихенизация» [1]) и увеличения доли травянистых растений (осок, злаков и др.) на техногенных местообитаниях («олуговение»).

В-пятых, «позеленение» арктических ландшафтов привело к формированию новой феноменологии в состоянии биоты [10] — исчезновению циклов леммингов, фрагментации ареала дикого северного оленя, продвижению на

север бореальных видов млекопитающих, изменениям распространения, путей миграций и динамики численности морских и водоплавающих птиц. Прогноз этих трендов возможен с использованием описанных выше подходов и методов, включающих синтез результатов дистанционных и наземных наблюдений и выявление «каскадного» и «кумулятивного» эффектов и синергизма воздействия на арктическую биоту климатических изменений и антропогенной трансформации ландшафтов.

Работа выполнена в рамках проекта «Биогеографические последствия современных природных и антропогенных воздействий на биоту Российской Арктики» программы фундаментальных исследований президиума РАН и государственного задания «Выявление биотических индикаторов устойчивого развития и оптимизации природопользования, создание биогеографических основ территориальной охраны природы».

Список литературы

- [1] Андреев В. Н. Геоботаническое исследование тундровых оленьих пастбищ // Советский Север. 1930. 5. С. 101—113.
- [2] Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. М.: Росгидромет, 2014. 93 с.
- [3] Елсаков В. В., Телятников М. Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и Западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. № 3. С. 260—271.
- [4] 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.
- [5] Кренке А. Н.-мл. Отображение факторов формирования компонентов ландшафта на основе тематических карт, дистанционной информации и трехмерной модели рельефа. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: Институт географии РАН, 2011. 24 с.
- [6] 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.
- [7] Тишков А. А. Экологическая реставрация нарушенных экосистем Севера. М.: Российская академия образования, 1996. 125 с.
- [8] Тишков А. А. Смена парадигм в биогеографии // Изв. РАН. Сер. геогр. 1998. № 5. С. 83—94.
- [9] Тишков А. А. Теория и практика сохранения биоразнообразия (к методологии охраны живой природы в России) // Бюлл.: Использование и охрана природных ресурсов в России, № 1 (85). 2006. С. 77—97.
- [10] Тишков А. А. Современные природные и антропогенные тренды состояния арктических ландшафтов и новый вектор международного научного сотрудничества в Российской Арктике // Современные производительные силы. 2015. № 3. С. 113—128.
- [11] Тишков А. А., Осокин Н. И., Сосновский А. В. Влияние синузий мохообразных на деятельный слой арктических почв // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 3. С. 39—47.

- [12] *Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., Pinzon J. E., Tucker C. J. and Polyakov I. V.* Recent declines in warming and arctic vegetation greening trends over pan-Arctic tundra // *Remote Sens. (Special NDVI3g Issue)*. 2013. N 5. P. 4229—4254.
- [13] *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. In: *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.
- [14] *Ehlers Eckart.* The anthropocene — new chance for geography? // *Die Erde*. 2010. Vol. 141, N 4. 2010. C. 164—183.
- [15] *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.
- [16] *Ims R. A., Henden J. A., Killengreen S. T.* Collapsing population cycles // *Trends Ecol. Evol.* 2008. Vol. 23. P. 79—86.
- [17] *Kausrud K. L., Mysterud A., Steen H., Vik J. O., Østbye E., Cazelles B., Framstad E., Eikeset A., Mysterud I., Solhøy T. & Stenseth N. C.* Linking climate change to lemming cycles // *Nature*. 2008. Vol. 456 (7218). P. 93—97.
- [18] *Kirdyanov A. V., Hagedorn F., Knorre A. A., Fedotova E. V., Vaganov E. A., Naurzbaev M. M., Moiseev P. A., Rigling 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.
- [19] *Puzachenko Y., Sandlersky 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.
- [20] *Sandlerkiy 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.
- [21] *Sturm M., Racine C. H., Tape K. D.* Increasing shrub abundance in the Arctic // *Nature*. 2001. Vol. 411. P. 546—547.
- [22] *Tape K., Sturm M., Racine C.* The evidence for shrub expansion in northern Alaska and the Pan-Arctic // *Global Change Biology*. 2006. N 12. P. 686—702.
- [23] *Walker D. A., Epstein H. E., Raynolds M. K. et al.* Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects // *Environ. Res. Lett.* 2012. Vol. 7. P. 1—17.

Поступило в редакцию
9 ноября 2015 г.

«Greening» of the Arctic landscape as a result of modern climate-caused and anthropogenic trends of vegetation cover

© A. A. Tishkov,¹ E. A. Belonovskaya, M. A. Waisfeld, P. M. Glazov, A. N. Krenke,
O. V. Morozova, I. V. Pokrovskaya, N. G. Tsarevskaya, G. M. Tertytsky

E-mail: ¹ tishkov@biodat.ru

With the use of remote sensing technology (Modis sensor 2000 and 2014, resolution of 2×2 km) a comparison was held for one-time evaluations of the transformation of landscapes of the Russian Arctic and the adjacent territory (forest-tundra and open woodland), as well as the trends of vegetation productivity. This allowed us to identify multi-scale, multi-temporal and multi-directional landscape changes in terms of the synergy between a changing climate and expanding economic activity. It is shown that at the modern stage simultaneously the two processes are observed: the growth of productivity («greening»), which is regarded as the effect of climate warming and anthropogenic transformation and its reduction due to focal frontal and anthropogenic disturbances of the vegetation cover. The mechanisms of reaction of vegetation, clarified by field studies and remote sensing data, are examined, such as shift of the forest border to the North, growth of bushes and grass and «delichenisation» of tundra. The conclusion is made about irreversibility of some changes and growth of areas with a destabilized condition of the arctic biota.

Key words: Arctic zone of Russian Federation, vegetation cover, productivity, NDVI vegetation index, northern forest border, «greening», bush and grass growth in tundra, «delichenisation» of tundra, biotic trends.

References

- [1] *Andreev V. N.* Geobotanicheskoe issledovanie tundrovyyh olen'ih pastbishh // *Sovetskij Sever*. 1930. 5. S. 101—113.
- [2] *Vtoroj ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmenenijah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. Tehnicheskoe rezjume*. M.: Rosgidromet, 2014. 93 s.
- [3] *Elsakov V. V., Teljatnikov M. Ju.* Mezhhodovye izmenenija indeksa NDVI na territorii Evropejskogo severo-vostoka Rossii i Zapadnoj Sibiri v usloviyah klimaticheskikh fluktuacij poslednih desjatiletij // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2013. N 3. S. 260—271.
- [4] *Kozlov D. N., Puzachenko M. Ju., Fedjaeva M. V., Puzachenko Ju. G.* Otobrazhenie prostranstvennogo var'irovaniya svojstv landshaftnogo pokrova na osnove distancionnoj informacii i cifrovoj modeli rel'efa // *Izv. RAN. Ser. geogr.* 2008. N 4. S. 112—124.
- [5] *Krenke A. N.-ml.* Otobrazhenie faktorov formirovaniya komponentov landshafta na osnove tematiceskikh kart, distancionnoj informacii i trehmernoj modeli rel'efa. Dis. kand. geogr. nauk. M.: Institut geografii RAN, 2011. 24 s.
- [6] *Lavrinenko I. A., Lavrinenko O. V.* Vlijanie klimaticheskikh izmenenij na rastitel'nyj pokrov ostrovov Barenceva morja // *Tr. Karel. nauch. centra RAN*. 2013. Vyp. 6. S. 5—16.
- [7] *Tishkov A. A.* Jekologicheskaja restavracija narushennyh jekosistem Severa. M.: Rossijskaja Akademiya Obrazovaniya, 1996. 125 s.
- [8] *Tishkov A. A.* Smena paradigim v biogeografii // *Izv. RAN. Ser. geogr.* 1998. N 5. S. 83—94.
- [9] *Tishkov A. A.* Teorija i praktika sohraneniya bioraznoobrazija (k metodologii ohrany zhivoj prirody v Rossii) // *Bjull.: Ispol'zovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii*, N 1 (85). 2006. S. 77—97.
- [10] *Tishkov A. A.* Sovremennye prirodnye i antropogennye trendy sostojanija arkticheskikh landshaftov i novyj vektor mezhdunarodnogo nauchnogo sotrudnichestva v Rossijskoj Arktike // *Sovremennye proizvoditel'nye sily*. 2015. N 3. S. 113—128.
- [11] *Tishkov A. A., Osokin N. I., Sosnovskij A. V.* Vlijanie sinuzij mohoobraznyh na dejatel'nyj sloj arkticheskikh pochv // *Izv. RAN. Ser. geogr.* 2013. N 3. S. 39—47.

- [12] *Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., JPinzon . E., Tucker C. J. and Polyakov I. V.* Recent declines in warming and arctic vegetation greening trends over pan-Arctic tundra // *Remote Sens. (Special NDVI3g Issue)*. 2013. N 5. P. 4229—4254.
- [13] *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. In: *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.
- [14] *Ehlers Eckart.* The anthropocene — new chance for geography? // *Die Erde*. 2010. Vol. 141, N 4. 2010. C. 164—183.
- [15] *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.
- [16] *Ims R. A., Henden J. A., Killengreen S. T.* Collapsing population cycles // *Trends Ecol. Evol.* 2008. Vol. 23. P. 79—86.
- [17] *Kausrud K. L., Mysterud A., Steen H., Vik J. O., Østbye E., Cazelles B., Framstad E., Eikeset A., Mysterud I., Solhoy T. & Stenseth N. C.* Linking climate change to lemming cycles // *Nature*. 2008. Vol. 456 (7218). P. 93—97.
- [18] *Kirdyanov A. V., Hagedorn F., Knorre A. A., Fedotova E. V., Vaganov E. A., Naurzbaev M. M., Moiseev P. A., Rigling 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.
- [19] *Puzachenko Y., Sandlerisky 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.
- [20] *Sandlerisky 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.
- [21] *Sturm M., Racine C. H., Tape K. D.* Increasing shrub abundance in the Arctic // *Nature*. 2001. Vol. 411. P. 546—547.
- [22] *Tape K., Sturm M., Racine C.* The evidence for shrub expansion in northern Alaska and the Pan-Arctic // *Global Change Biology*. 2006. N 12. P. 686—702.
- [23] *Walker D. A., Epstein H. E., Raynolds M. K. et al.* Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects // *Environ. Res. Lett.* 2012. Vol. 7. P. 1—17.