
**ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ**

УДК 504.05 (571.121:574.45)

**“ПОЗЕЛЕНЕНИЕ” РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ И СОВРЕМЕННЫЕ
ТРЕНДЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЕ БИОТЫ**

© 2016 г. Е.А. Белоновская, А.А. Тишков, 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, Россия
e-mail: belena53@mail.ru, tishkov@biodat.ru, mvaisfeld@mail.ru*

Поступила в редакцию 02.11.2015 г.

В 2014–2015 гг. с использованием дистанционных методов (ДЗЗ) и полевых исследований проведены обзорные оценки изменений ландшафтов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и их влияния на продуктивность растительного покрова. Выявлены разномасштабные, разновременные и разнонаправленные трансформации растительного покрова в условиях синергизма действий меняющегося климата и хозяйственной деятельности. Показано, что на современном этапе наблюдаются одновременно процессы роста продуктивности (“позеленение”), который рассматривается как эффект сопряженного действия потепления климата и хозяйственного освоения, и ее снижение за счет очаговых и фронтальных антропогенных нарушений почвенно-растительного покрова. По итогам синтеза результатов полевых наблюдений выявлены прямые и опосредованные влияния “позеленения” тундры на численность, распространение и миграции млекопитающих и птиц Арктики. Сделан вывод о необратимости некоторых изменений и о направленном 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”, “олуговение” и “делихенизация” тундры, тренды биоты.

Во Втором Оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [3] отмечено, что скорость потепления климата Северной Евразии на перспективу сохранится (в пределах 0.43 °C/10 лет). Арктика – один из четырех регионов мира, отнесенных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) к наиболее уязвимым изменениям климата [10]. Глубокие климатогенные перестройки арктических экосистем выявлены для североамериканского сектора Арктики [41]. Имеются отдельные публикации, позволяющие сделать вывод о трансформации тундр Российской Арктики, их “позеленении” [23, 25], например, на островах Баренцева моря [15] и на п-ове Ямал [36]. 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, теплового режима почв и большей доступности питательных веществ для растений. В рамках проекта “Биогеографические последствия современных природных и антропогенных воздействий на биоту Российской Арктики” Программы фундаментальных исследований Президиума РАН в 2014–2015 гг. авторами проведен анализ, позволивший выявить не только масштабные изменения продуктивности растительности арктических и приарктических территорий России в период с 2000 г. по 2014 г., но и тренды отдельных групп биоты, обусловленные этими изменениями [25] – в структуре и динамике растительности, составе, численности и распространении разных групп млекопитающих и птиц.

Ранее интернациональный коллектив экспертов [44] проанализировал данные спутниковых съемок Арктики за период с 1982 по 2008 г. и установил, что в высоких широтах Канадской Арктики, Северной Аляски, Северной Евразии *рост максимальных значений NDVI достигает 15%*. Увеличение NDVI авторы связывают с потеплением климата. 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)*. В течение последних 20–30 лет наиболее заметные изменения, в том числе возрастание надземной и подземной фитомассы, увеличение обилия доминирующих видов растений, произошли именно в высокоширотной Арктике. Эти изменения, по мнению авторов, были ответом на повышение температуры воздуха за последние десятилетия, увеличение продолжительности вегетационного периода и более глубокое протаивание активного слоя почв. Ранее эти закономерности были выявлены Н.И. Базилевич и А.А. Тишковым [32] при анализе пространственных закономерностей продуктивности тундрового биома.

Методика исследований. Для оценки природных и антропогенных изменений ландшафтов может быть использовано сравнение данных дистанционного зондирования по годам. С середины 1980-х годов накоплен значительный архив материалов дистанционного зондирования ландшафтов Арктики. В нашей работе использованы данные сенсора *Modis*, космические снимки с разрешением 2×2 км 2000 и 2014 гг. С их помощью одновременно охвачен российский сектор территорий, примыкающих к Северному Ледовитому океану. Данный сенсор как раз начал работать 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). Для анализа использованы известные подходы и методы дистанционного исследования динамики ландшафтов [39, 40]. В настоящей статье предложен сравнительно новый подход к выявлению трендов динамики арктических ландшафтов на основе сравнения рядов дистанционных данных. Демонстрация подхода производится для преимущественно безлесных территорий АЗРФ.

Ограничение задач дистанционного зондирования связано с отказом от детальности анализа состава и структуры растительного покрова, которые выявляются на основе полевых наблюдений. Объектом дистанционного зондирования выступает пространственная и временная динамика состояния ландшафта, который условно разделен на два типа: (1) **“продуктивный”**, с более высокими по сравнению с зональными показателями надземной массы растений (фрагменты древесной в кустарниковых тундрах, кустарниковый покров в кустарничковой тундре, участки “олуговления” с доминированием осок и злаков на месте мохово-лишайниковых и мохово-кустарничковых зональных тундр), и (2) **“низкопродуктивный”**, лишенный растительности или с доминированием трансформированной (механически, за счет пожаров, транспортного повреждения или загрязнения). Предложенными методами анализа определялись пространственные изменения продуктивности растительности условно выделенных групп ландшафтов.

Анализ проводился в два этапа: (1) составление ландшафтной схемы рассматриваемого макрорегиона “арктических и приарктических территорий” с разбиением на “продуктивные” и “низкопродуктивные” фоновые территории, (2) сравнения продукционных показателей выделенных групп ландшафтов 2000 и 2014 гг. и выделения территорий с трендами увеличения или уменьшения запасов фитомассы.

Первый этап работы выполнялся по технологии актуализации тематических карт на основе дистанционной информации, разработанной одним из авторов статьи [12, 13]. Данная технология опирается на следующие положения:

- Мультиспектральная отраженная радиация, измеряемая сенсором *Modis*, несет в себе информацию о фундаментальных процессах преобразования солнечной энергии земной поверхностью, определяемых структурой растительности, почвенно-геохимическими условиями и увлажнением в конкретной территориальной единице измерения (пикселе).

- Свойства растительного и почвенного покрова – функции формы земной поверхности, количественно описываемые через трехмерную модель рельефа.

- Если специальная карта (в нашем случае растительности, продуктивности и т.п.) достаточно надежно отражает реальность, то она должна статистически значимо воспроизводиться через мультиспектральную информацию и выявляемые дистанционно характеристики рельефа.

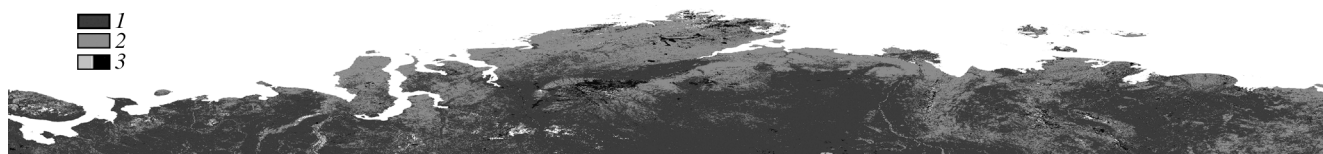


Рис. 1. “Продуктивные” (1) и “низкопродуктивные” (2) ландшафтные покровы арктических и приарктических территорий России по данным ДЗЗ 2000 г., Modis (3 – искажения, водоемы, скальные обнажения).

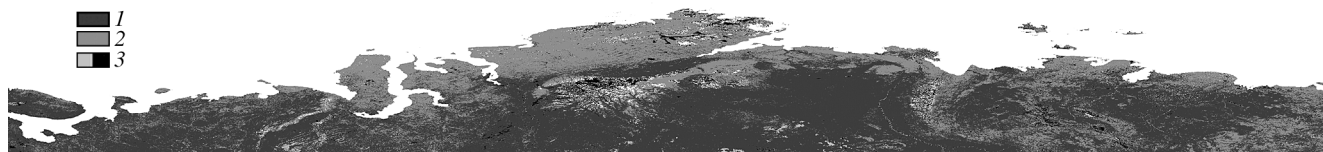


Рис. 2. “Продуктивные” (1) и “низкопродуктивные” (2) ландшафтные покровы арктических и приарктических территорий России по данным ДЗЗ 2014 г., Modis (3 – искажения, водоемы, скальные обнажения).

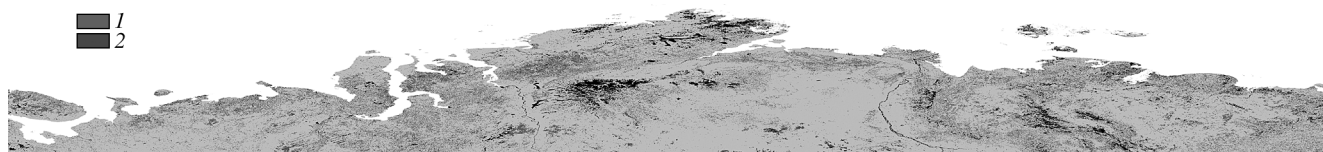


Рис. 3. Новые “продуктивные” (1) и “низкопродуктивные” (2) состояния ландшафтного покрова арктических и приарктических территорий России, выявленные при сопоставлении данных ДЗЗ 2000 и 2014 гг., MODIS.

– Если эта воспроизводимость математически доказана, то можно на основе полученной зависимости обосновать алгоритм интерполяции состояний объекта картографирования на всю территорию и, соответственно, получить карту актуального состояния ландшафта и его компонентов (в том числе растительности).

В качестве картографической основы (тематической карты) взят фрагмент Карты растительности СССР м-ба 1 : 4 000 000 [9] для АЗРФ. Масштаб карты и ее легенда позволяют отразить основные ландшафтные типы рассматриваемого региона и в целом соответствуют используемому разрешению данных дистанционного зондирования (ДЗЗ). 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.

Используя дискриминантный анализ, построим “вероятностные поля”, определяющие для каждого дискретного состояния достоверность его встречаемости на каждом участке реального

пространства. В данном случае мы распознавали всего два состояния ландшафтного покрова: “продуктивное” и “низкопродуктивное”. Качество распознавания на космических снимках составило более 0.9 для каждого срока (2000 и 2014 гг.). В результате было получено достоверное отображение распределения двух основных типов ландшафтного покрова по годам (рис. 1, 2).

Результаты исследований. Совмещение результатов анализа (рис. 1, 2) позволило определить места перехода одного класса состояний ландшафта в другой (таблица). Суммарно площадь распространения древесно-кустарниковой и другой продуктивной растительности (собственно “позеленения” тундры) составила 307 432.8 км², тогда как деградация ландшафта, замена продуктивных растительных сообществ менее продуктивными (в том числе, возникших в результате перевыпаса домашних оленей, пожаров, механических нарушений, химического загрязнения и пр.) составила около 314 068.7 км². Процессы “позеленения” и процессы деградации ландшафта в границах арктических и приарктических территорий в масштабах последних двух десятилетий, по-видимому, компенсируют друг друга в абсолютных показателях, однако наблюдается значительная их пространственная диффе-

ренция (рис. 3), а суммарно они представляют площадь, где развиваются процессы дестабилизации.

На рис. 3 показаны арктические и приарктические территории, которые в первое десятилетие XXI в. стали более продуктивными, в том числе за счет активного *продвижения границы леса на север*. Анализ выявил следующие пространственные изменения в состоянии древесно-кустарниковой растительности вдоль южной границы АЗРФ:

- восстановление (расширение площадей) древесной и кустарниковой растительности Кольского полуострова (в том числе на участках растительности, ранее трансформированной выбросами Мончегорского и Печенгского комбинатов растительности);
- формирование продуктивных древесно-кустарниковых покровов вдоль побережья Чешской губы, междуречий рр. Ома, Индига и Пеша в Малоземельской тундре;
- расширение к северу очагов лесной растительности в низовьях р. Печора;
- появление новых участков леса и кустарниковых зарослей в долинах рек и на склонах Полярного Урала, на юге п-вов Ямал и Тазовский;
- расширение лесных островов на Восточном Таймыре (Ары-Мас и р. Белой);
- продвижение на север древесно-кустарниковой растительности в низовьях Анабары, Оленека, Лены, Яны и Индигирки.

В.Н. Андреев [2] еще в середине XX в. сопоставил положение северной границы леса и лесных островов в тундре с их состоянием в прошлом (по материалам исследований конца XIX – начала XX в. (материалы А.Г. Шренка, Г.И. Танфильева, Р. Поле и др.)). Было установлено, что в местах, где древесная растительность на северном пределе наблюдалась 50–100 лет назад, она прочно удерживает свои позиции, а площади большинства северных лесных островков, находившихся ранее в угнетенном состоянии, развивались. О “зоне относительного безлесья” европейских тундр говорил и писал В.В. Крючков [11], 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] показали, 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 смещению границы ареала ели си-

Таблица. Доли площади, занимаемые разными типами ландшафтного покрова АЗРФ в 2000 и 2014 гг., %

2000	2014	
	“продуктивный”	“низкопродуктивный”
“продуктивный”	88.18	9.90
“низкопродуктивный”	21.89	75.96

бирской на север, в частности, продвижению ее по долинам тундровых рек, текущих в меридиональном направлении, и увеличению площади островных ельников. Сопоставив описания ландшафтов, сделанные А.Г. Шренком в экспедиции по Большеземельской тундре в 1837 г., с современной картиной, авторы утверждают, что за последние 165 лет произошло продвижение ели на север по долинам р. Сандивей (приток р. Колвы) и р. Северной. Также наблюдается расширение площади еловых островов в бассейнах рек Ортина и Море-Ю.

В последнее время отмечается прогрессирующий характер развития лесной растительности на северном пределе и в других регионах АЗРФ. Так, 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 р. Новой. В горных районах Полярного Урала заметно продвижение лиственниц вверх по склону на 20–60 м на протяжении всего XX в.

Расширение лесных экосистем к северу связано прежде всего с изменением глубины протаивания 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 [3]. В АЗРФ данные мониторинга на восьми геоэкологических стационарах от дельты Печоры до Колымы отмечено потепление многолетнемерзлых пород, особенно в лесотундре Европейского Севера и Западной Сибири [5]. Общий тренд границы предтундровых редколесий на север составил за последние 30 лет от 10 км до 30 км [38].

Северная граница леса, как правило, включается в Арктический биом как его южная граница [43], но для АЗРФ далеко не всегда эти границы совпадают. Применительно к Северной Евразии однозначно по полевым наблюдениям и по результатам анализа космических снимков последних

десятилетий отмечается активное продвижение леса в тундру. Аналогичная картина наблюдается и в других регионах Арктики [34, 37]. Современное появление подроста лиственниц в тундровой зоне зафиксировано в Западной Сибири [5], на севере Восточной Сибири, а также на плато Путорана [38]. Экспансия верхней границы леса в этом регионе и изменение жизненной формы деревьев совпало со значительным увеличением летних температур и зимних осадков [27–29].

Следует отметить, что наблюдается и цикличность в освоении древесной растительностью тундрового пространства АЗРФ, что связано с колебаниями климата. Так, в междуречьях притоков р. Пур у южной границы тундровой зоны в 1997–1999 гг. отмечалось появление всходов лиственницы, а в начале 2000-х годов они полностью исчезли после нескольких холодных зим [5].

Следует отметить, что в некоторых случаях “позеленение” тундр АЗРФ можно рассматривать как эффект *внутриландшафтного расширения площади кустарниковой растительности*. Детальный анализ рис. 3 показывает, что “позеленение” иногда определяется увеличением доли кустарников в растительном покрове водоразделов за счет их экспансии из долин рек и понижений. Такое явление, по результатам полевых наблюдений авторов статьи, в настоящее время отмечается на Кольском п-ове, в Большеземельской тундре, на Полярном Урале, в низкогорьях Восточной Сибири и на севере Дальнего Востока. Практически для всех тундровых кустарников и стланников (pp. *Betula*, *Salix*, *Duschekia*, *Pinus pumila*), произрастающих в АЗРФ, позитивным фактором для роста оказалось увеличение в последнее десятилетие периода вегетации, суммы активных температур и глубины деятельного слоя. В отношении механизма “позеленения” (соответственно повышения запасов надземной фитомассы) возможны три варианта “поведения” кустарников: (1) формирование нового кустарникового яруса (в дополнение к мохово-лишайниковому и травяно-кустарничковому), (2) изменение формы роста существующих кустарников из стелющейся формы в пряморастущую, и (3) экспансия кустарников из защищенных мест (понижений) на водораздельные пространства. Суммарно все они дают эффект сравнительно быстрого роста запасов фитомассы и влияния на микроклимат (за десятилетие). При этом происходит дальнейшее закрепление кустарников в тундровом ландшафте за счет увеличения прироста, накопления опада, снегозадержания и пр.

Сходные с АЗРФ процессы наблюдаются и на севере Аляски (р. *Duschekia*), на западе канадской Арктики (pp. *Duschekia* и *Salix*, в высокой Арктике – карликовые формы *Salix*, в Северном Квебеке – р. *Betula*) [36, 41, 42]. В целом тенденция закустаривания отмечена в глобальном масштабе для многих безлесных биомов – помимо Арктики она наблюдается на лугах и пастбищах других зон и в горах.

В тундре в числе заметных последствий климатического потепления последних десятилетий можно отметить активизацию криогенных склоновых процессов на возвышенных равнинах, сложенных суглинистыми породами морского генезиса, например, на Ямале, где на оползневых склонах возможно произрастание аномальных для этих широт высокоствольных ивняков [17, 26].

Ольховник (*Duschekia fruticosa*) имеет циркумполярное распространение и доминирует среди кустарников в ряде районов АЗРФ. Он часто имеет необычное пространственное распределение – в виде отдельных растущих кустов, которые возвышаются над тундровой растительностью. Такие кустарниковые сообщества описаны в южных и типичных тундрах Российской Арктики и во внутренней части горной Аляски [33].

Интересно, что развитие кустарников, в свою очередь, 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, что сказывается на тепловом режиме деятельного слоя почв. Эти обратные связи по принципу “каскадного эффекта” вызывают реакцию всех компонентов ландшафта и, в итоге, могут привести в дальнейшем к деградации кустарникового покрова.

При детальном анализе рис. 3 четко прослеживаются два направления трендов растительности тундр – *сокращение покрытия мхов и лишайников и “олуговение”* (рост доли злаков и осок в растительном покрове). 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), а ранее – с периодическими подъемами численности леммингов, нарушающими целостность растительности. Но, по-видимому, первичные причины лежат в поведении криолитосферы в условиях потепления климата

Арктики. Климатогенные изменения в данном случае не ограничиваются изменением прироста растений, перестройками в составе арктических фитоценозов и ростом их продуктивности [32]. Насколько широко распространены современные процессы “делихенизации” тундр и деградации 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 для районов Европейского Севера, а затем и для Якутии прямую связь делихенизации с интенсивным выпасом оленей и последующим олуговением тундры. Для современного этапа это подтверждает В.Н. Карпов [8], который проследил динамику растительности деградированных тундровых пастбищ Якутии и показал, что изменения, происходящие в их растительном покрове под влиянием выпаса (смена лишайникового покрова травяно-кустарниковой или кустарничково-зеленомошной растительностью), приводят к изменению хозяйственного запаса оленьих кормов и пересмотру сезонного статуса пастбищ. Отсюда вполне логичным видится и вывод о нарастающем в последние годы дефиците зимних пастбищ как дикого, так и домашнего оленя в Арктике.

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.

Результаты дистанционного анализа (рис. 1–3) подтверждают выявленные ранее на локальном и региональном уровнях *тренды роста продуктивности зональной растительности в условиях потепления климата* и как реакции на нарушения целостности растительного покрова. Но, ни в масштабах всей Арктики [31], ни применительно к арктическим регионам Северной Евразии [20–22, 32] сопоставление потерь запасов и продукции фитомассы в результате антропогенной трансформации и их увеличения в результате потепления и формирования новых местообитаний не проводилось. Косвенные оценки продуктивности тундр через измерение запасов и эмиссии углерода в тундровых экосистемах проводились в конце XX в. [19–21, 30]. Понятно, что увеличе-

ние минерализации органических соединений, образования CO_2 и соединений азота при росте активных температур вегетационного периода возможно в тундрах далеко не повсеместно, а преимущественно в экосистемах с высокой долей участия в покрове травянистой растительности. Это позволяет предположить, что возможный механизм увеличения продуктивности растений при потеплении климата в Арктике связан с интенсификацией активности микроорганизмов в почве и ростом доступности биогенов для растений.

Пик продуктивности тундровых ландшафтов пришелся на конец 1990 – начало 2000-х годов и явился следствием не столько увеличения продукции растительного покрова *in-situ*, сколько *внутриландшафтного перераспределения растительных сообществ и расширения площади их более продуктивных типов*: на границе леса и в южных тундрах – лесных и высокоствольных кустарниковых, в типичных тундрах – кустарниковых и травяных, в арктических тундрах – кустарничковых и травяных (злаковых) сообществ.

Для выявления возможных трендов биологической продуктивности выделенных типов ландшафтного покрова нами был проведен анализ продукта *Yearly Gross productivity*, рассчитанного на основе мозаик *Modis*. 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 убрать краткосрочные колебательные процессы*, так как многие авторы за последние десятилетия отмечают как раз, наоборот, рост первичной продукции. Например, по данным Второго Оценочного доклада Росгидромета (2014) 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], обусловленную увеличением продолжительности вегетационного периода в Арктике. Для АЗРФ подобные оценки проведены, например, для о-вов Колгуев и Вайгач, где выявлено с конца 1980-х годов по настоящее время “позеленение” тундры, а

рост максимальных значений NDVI составил 15% и 30% соответственно [15]. Оно 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 (“олугование”) и ивняков (“закустаривание”), хотя на циркумполярной карте изменений MaxNDVI в Арктике для прилегающих к островам материковых территорий Большеземельской тундры отмечены отрицательные тренды MaxNDVI (–4 – –6%), а максимальные значения за последние 30 лет показаны для всей канадской Арктики и севера Аляски. В отношении Российской Арктики прирост показателей запасов и продукции фитомассы отмечается для юга Восточного Таймыра и междуречья Анабары и Оленека. Здесь возрастание запасов и продукции фитомассы тесно коррелирует с ростом средних летних температур, увеличением продолжительности вегетационного периода, а также увеличением глубины деятельного слоя [31].

“Позеленение” Арктики как результат расширения площадей антропогенно нарушенных территорий. Ранее мы обсуждали, преимущественно, вопросы климатогенной динамики ландшафтов и растительности АЗРФ. Но результаты дистанционного зондирования (рис. 1–3) и полевых наблюдений показали, что некоторые ареалы “продуктивных” ландшафтов АЗРФ сформировались в зонах нового хозяйственного освоения – в Большеземельской тундре, на Ямале, Гыдане, на Таймыре и на севере Якутии. Подтверждением этого факта можно рассматривать то, что крупные ареалы “продуктивных” ландшафтов сформировались в последние десятилетия: (1) в границах ареалов хозяйственного освоения нефтегазовых месторождений 1970–1980-х годов в Ненецком а.о., в Республике Коми, в Ямало-Ненецком а.о. (Бованенково, Харасавей, Обь-Тазовское междуречье, п-ов Тазовский, юг п-ова Гыдан), (2) вокруг арктических населенных пунктов, (3) вдоль крупных линейных сооружений (дорог, газо- и нефтепроводов). Эффект повышения продуктивности в данном случае достигается снятием антропогенных нагрузок с нарушенного участка и формированием здесь благоприятных условий (тепла, влаги, дренированности и более раннего схода снега) для развития вторичной преимущественно злаковой растительности, в том числе адвентивной [18, 19]. Интересно, что при сохранении действия антропогенного фактора (например, на обширных пространствах лесотундры вокруг Норильского комбината) эти процессы не наблюдаются. Здесь исходная раститель-

ность более продуктивная, чем в “техногенной пустыне”.

Формирование вторичной растительности на новых (антропогенных) субстратах происходит в основном за счет видов интразональных и азональных 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 *Cyperaceae*, *Equisetaceae*, *Juncaceae*, *Poaceae*, *Potamogetonaceae*, *Ranunculaceae*, *Sparganiaceae* формируются в результате криогенных просадок, роста мощности деятельного слоя при увеличении протаивания почвы или в отсутствие дренажа. Такой процесс “олугования” тундры, связанный с механическими повреждениями лишайникового, мохового и кустарничкового покрова и появлением техногенных водоемов в местах протаивания, отмечается многими исследователями тундр [18, 19, 21].

Закономерен вопрос, связанный с процессом антропогенного “олугования” тундр, о сукцессионном статусе новых травянистых фитоценозов, о продолжительности их существования и развитии после снятия антропогенного пресса. Во-первых, чаще всего “отравленные тундры” – это 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 [18]. Сравнительно быстро эти сукцессионные восстановительные процессы происходят в современных климатических условиях на дренированных участках в районах с проявлениями континентальности климата. Так, за 26 лет спутниковых наблюдений с использованием AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) спутников NOAA на территории Ямала изменения растительного покрова незначительные [6, 7], что достаточно контрастно в сравнении с Аляской или Северной Америкой [44], 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, формируется кайма макрофитов и зональность растительности по градиенту влажности.

Тренды “олугования” на Европейском Севере помимо антропогенной трансформации зональ-

ной растительности в последние десятилетия, несомненно, определяются и 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.

Современные тренды арктической биоты как следствие “позеленения” тундры. Ответная реакция растительности на климатические изменения в Арктике не ограничивается изменениями индивидуального роста растений и состава арктических сообществ. Например, вышеупомянутая экспансия кустарников и деревьев способствует аккумуляции снега, увеличению зимних почвенных температур, повышению микробной активности почвы и, соответственно, накоплению питательных веществ в почве, что в свою очередь стимулирует дальнейший рост древесно-кустарникового покрова. Ответы растительности на изменения климата могут быть более сложными, чем те, которые получены при экспериментах, имитирующих потепление (например, на фито-тронах).

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, выявленных в процессе полевых исследований авторов статьи в последние годы. Перечислим некоторые из этих трендов, наиболее ярко отражающих суть “каскадного” и кумулятивного эффекта потепления климата и “позеленения” тундры [25]:

- изменения в характере динамики численности леммингов (норвежского, копытного и сибирского леммингов), *исчезновение ее выраженной цикличности*, характерной ранее для многих регионов АЗРФ;

- *фрагментация ранее сплошного ареала дикого северного оленя* [4] и формирование “очагов” обитания его “микропопуляций”, лимитирующим фактором распространения которых выступают зимние пастбища и участки антропогенной нарушенной тундры;

- *расширение ареала некоторых бореальных видов млекопитающих* (бурый медведь, рысь) и птиц на север, сокращение площади летнего ареала песка;

- коренные изменения в распределении и численности некоторых видов морских птиц Арктики; так, популяции толстоклювой кайры

в последнее десятилетие в североатлантических регионах АЗРФ резко снизили численность, что связано с повышением температуры поверхностных вод морей, сдвинувшим в начале XXI в. пик доступности пищевых объектов на более ранний сезон и вызывающим ежегодно массовую гибель птенцов;

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

- в западной части АЗРФ наблюдаемый в последние десятилетия рост численности видов гусеобразных (кроме гуся-пискульки), малого лебедя и *снижение численности уток также связаны с эффектом “позеленения” тундр*: основу питания гусей составляют зеленые части однодольных растений, доля которых увеличивается; практически все виды арктических уток питаются в основном животными кормами, их численность зависит от состояния кормовой базы и интенсивности воздействия хищников, которые из-за отсутствия циклов у леммингов интенсивнее разоряют гнезда уток на земле;

- *разнонаправленные тренды изменения ареала и численности арктических видов куликов*, наблюдаемые в последние десятилетия; например, из 57 видов куликов у 23 видов наблюдается расширение области распространения в АЗРФ и только у трех, условия зимовки которых ухудшились, ареал сокращается; позитивные тренды численности популяций отмечены у 14 видов, циклический характер численности сохранился у 10 видов, только у четырех видов численность падает.

Закключение и выводы. Подводя итоги проведенного анализа, можно суммировать его результаты.

Во-первых, если раньше в отношении Российской Арктики бытовало мнение, что доля нарушенных территорий едва достигает 1–2% площади, то проведенный анализ дает основание говорить о существенном расширении площадей с трансформированным почвенно-растительным покровом (до 10% и более), а общая площадь территорий с дестабилизированным режимом функционирования может достигать более 20% общей площади АЗРФ.

Во-вторых, сам факт масштабных перестроек, происходящих в наземных экосистемах тундровой зоны, подтверждает тезис о наступлении новой эры в развитии природы Земли и непосредственно арктических и приарктических территорий Северной Евразии – *антропоцене* [23, 35], для которого в границах АЗРФ характерны процессы “бореализации” фауны и адвентизации флоры.

В-третьих, география как наука синтетическая и ориентированная на обязательную гуманитарную составляющую в исследованиях получает по сути дела новый актуализированный объект исследований, для оценки динамики которого необходима новая методологическая база, описание которой отчасти заложено и в *Выводах по результатам настоящих исследований*.

1. Повышения продуктивности растительности и расширения площадей, занятых более продуктивными растительными сообществами в АЗРФ (эффект “позеленения” тундры), могут быть оценены путем сравнения разногодичных данных дистанционного зондирования и трендов NDVI, а также за счет сравнения продукционных показателей ландшафтов и выделения территорий с трендами увеличения или уменьшения запасов фитомассы.

2. За период с 2000 по 2014 гг. для сухопутных экосистем арктических и приарктических территорий Северной Евразии отмечено увеличение значений NDVI, то есть “позеленение” тундры, которое проявляется через рост проективного покрытия и обилия растений разных жизненных форм (в том числе деревьев, кустарников, осок и злаков), за счет снижения проективного покрытия мохообразных и лишайников (“делихенизация”) и увеличения доли в антропогенно трансформированных сообществах травянистых растений (осок, злаков и др.). Применяемые в настоящей работе методы ДЗЗ также позволяют выявить снижения продуктивности некоторых антропогенно трансформированных ландшафтов, которые на ранних стадиях восстановительной сукцессии имеют низкие запасы фитомассы и демонстрируют “каскадный эффект” в развитии криогенной деградации почвогрунтов.

3. Прирост площади “продуктивного” ландшафтного покрова, где собственно и выявляется “позеленение” тундры в период с 2000 по 2014 гг. на исследованных территориях АЗРФ (рис. 3) составил 307 432.8 км², тогда как деградация ландшафта, замена продуктивных зональных и интразональных растительных сообществ менее продуктивными за счет кумулятивного эффекта –

314 068.7 км². Таким образом, можно отметить, что процессы “позеленения” и процессы антропогенной и климатогенной деградации, по-видимому, компенсируют друг друга в абсолютных показателях, однако наблюдается значительная их пространственная дифференциация (рис. 3). Суммарно они представляют территории с *дестабилизированным режимом развития*.

4. Из-за относительной молодости арктических и приарктических территорий и высокой роли в их динамике абиотических факторов, действующих на биоту и экосистемы сильнее, чем внутриценотические факторы, любые природные (в том числе климатогенные) и антропогенные воздействия приводят к более глубоким, чем в южных регионах, трансформациям ландшафтов. Филоценогенез (эволюционное развитие биотического комплекса ландшафтов) в Арктике существенно редуцирован, а синергизм в действиях природных и антропогенных факторов нарушает необратимо его ход. Это может приводить в ряде случаев к формированию покрова длительноживущих, полуприродных, низкопродуктивных и “малонаселенных” (с низким уровнем биоразнообразия) ландшафтов. Но, в некоторых случаях, на зональных экотонах “лес – тундра”, “кустарниковые южные тундры – мохово-кустарничковые типичные тундры”, “горные кустарники – голцы” и др., а также на антропогенно нарушенных поверхностях в условиях потепления климата и нарушения целостности низкопродуктивного почвенно-растительного покрова в АЗРФ могут формироваться более продуктивные фитоценозы с продолжительным периодом существования – тундровые редколесья, высокоствольные кустарники, луговины и пр.

Определение текущих трендов состояния арктических ландшафтов и оценка перспектив их разномасштабных, разновременных и разнонаправленных изменений (прогноз) возможны с использованием описанных выше подходов и дистанционных методов с использованием архива данных Modis.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта “Биогеографические последствия современных природных и антропогенных воздействий на биоту Российской Арктики” Программы фундаментальных исследований Президиума РАН 2014–2016 гг. и проекту 0148-2014-0017 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. *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.: Тов-во науч. изданий КМК, 2009. 310 с.
5. *Дроздов Д.С., Украинцева Н.Г., Царев А.М., Чекрыгина С.Н.* Изменения температурного поля мерзлых пород и состояния геосистем на территории Уренгойского месторождения за последние 35 лет (1974–2008) // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 22–31.
6. *Елсаков В.В., Марущак И.О.* Межгодовые изменения термокарстовых озер Северо-Востока Европейской России // Исследования Земли из космоса. 2011. № 5. С. 45–57.
7. *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.
8. *Карпов Н.С.* Динамика растительности оленьих пастбищ тундровой зоны Северо-Востока Якутии. Дис. ... докт. биол. наук. Якутск: Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, 2006. 369 с.
9. Карта растительности СССР. М-б 1 : 4 000 000. М.–Л.: 1980.
10. *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.
11. *Крючков В.В.* Агролесомелиорация тундры. М.: Лесная промышленность, 1978. 168 с.
12. *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.
13. *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, 24 с.
14. *Лавриненко О.В., Лавриненко И.А.* Островные ельники восточно-европейских тундр // Ботанич. журн. 2003. Т. 88. № 8. С. 59–77.
15. *Лавриненко И.А., Лавриненко О.В.* Влияние климатических изменений на растительный покров островов Баренцева моря // Тр. КНЦ РАН. 2013. Вып. 6. С. 5–16.
16. *Оберман Н.Г.* Глобальное потепление и изменение криолитозоны Печоро-Уральского региона // Разведка и охрана недр. 2007. № 4. С. 63–68.
17. *Ребристая О.В., Хитун О.В., Чернядьева И.В., Лейбман М.О.* Динамика растительности на криогенных оползнях в центральной части полуострова Ямал // Ботанич. журн. 1995. Т. 80. № 4. С. 31–48.
18. *Тишков А.А.* Экологическая реставрация нарушенных экосистем Севера. М.: Российская Академия Образования, 1996. 125 с.
19. *Тишков А.А.* Антропогенная трансформация флоры и экологическая политика на Севере / Флора антропогенных местообитаний Севера. М.: Институт 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. 309 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 синузий мохообразных на деятельный слой арктических почв // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 3. С. 39–47.
24. *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.
25. *Тишков А.А., Белоновская Е.А., Вайсфельд М.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Покровская И.В., Пушкарев С.В., Тertiцкий Г.М., Титова С.В., Царевская Н.Г.* Биogeографические последствия современных природных и антропогенных воздействий на биоту Российской Арктики. 2015. www.ras.ru/Fstorage/Download.aspx?id=eccfde90-9a4e-4fdd-8c04-4dc86dbc4d71
26. *Украинцева Н.Г.* Ивняковые тундры Ямала как индикатор засоленности поверхностных отложений // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1997. С. 182–187.
27. *Шиятов С.Г.* Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под

- влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 219 с.
28. 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.
 29. Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. 2005. № 2. С. 1–8.
 30. Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Климатогенная динамика лесотундровой растительности на Полярном Урале // Лесоведение. 2007. № 6. С. 11–22.
 31. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В. Запасы органического углерода в почвах тундровых и лесотундровых экосистем // Экология. 1999. № 6. С. 426–432.
 32. 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. No. 5. P. 4229–4254.
 33. Bazilevich N.I. and 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. Vol. 3. Polar and alpine tundra*. Ed.: F.E. Wielgolaski. Amsterdam–Lausanne–New York–Oxford–Shannon–Singapore–Tokyo. Elsevier publ., 1997. P. 509–539.
 34. Chapin F.S. III, McGraw J.B., and Shaver G.R. Competition causes regular spacing of alder in Alaskan shrub tundra // *Oecologia*. 1989. Vol. 79. P. 412–416.
 35. Danby R.K. and Hik D.S. Variability, contingency and rapid change in recent subarctic alpine tree line dynamics // *Journal of Ecology*. 2007. Vol. 95. P. 352–363.
 36. Eckart E. The anthropocene – new chance for geography? *Die Erde*. 2010. Vol. 141. No. 4. C. 164–183.
 37. Forbes B.C., Fauria M.M., and Zetterberg P. Russian arctic warming and ‘greening’ are closely tracked by tundra shrub willows // *Global Change Biology*. 2010. No. 16. P. 1542–1554.
 38. Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., and Duncan R.P. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming // *Ecology Letters*. 2009. No. 12(10). P. 1040–1049.
 39. Kirdyanov A.V., Hagedorn F., Knorre A.A., Fedotova E.V., Vaganov E.A., Naurzbaev M.M., Moiseev P.A., and 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.
 40. Puzachenko Y., Sandlerisky R., and 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.
 41. Sandlerisky R. and Puzachenko Y.G. Dynamic of landscape energetic characteristics based on remote sensing data // *The Problems of Landscape Ecol*. 2011. Vol. 333. P. 125–132.
 42. Sturm M., Racine C.H., and Tape K.D. Increasing shrub abundance in the Arctic // *Nature*. 2001. Vol. 41. No. 1. P. 546–547.
 43. Tape K., Sturm M., and Racine C. The evidence for shrub expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. *Global Change Biology*. 2006. No. 12. P. 686–702.
 44. Walker D.A., Raynolds M.K., Daniëls F.J.A., Einarsson E., Elvebakk A., Gould W.A., Katenin A.E., Khodolod S.S., Markon C.J., Melnikov E.S., Moskalenko N.G., Talbot S.S., and Yurtsev B.A. The Circumpolar Arctic vegetation map // *Journal of Vegetation Science*. 2005. Vol. 16. P. 267–282.
 45. Walker D.A., Epstein H.E., Raynolds M.K., Kuss P., Kopecky M.A., Frost G.V., Daniëls F.J.A., Leibman M.O., Moskalenko N.G., Matyshak G.V., Khitun O.V., Khomutov A.V., Forbes B.C., Bhatt U.S., Kade A.N., Vonlanthen C.M., and Tichy L. Environment, vegetation and greenness (NDVI) along the North America and Eurasia Arctic transects // *Environ. Res. Lett*. 2012. No. 7. P. 1–17.

“Greening” of the Russian Arctic and the Modern Trends of Transformation of Its Biota

**E.A. Belonovskaya, A.A. Tishkov, M.A. Vaisfeld, P.M. Glazov, A.N. Krenke (junior),
O.V. Morozova, I.V. Pokrovskaya, N.G. Tsarevskaya, G.M. Tertitskii**

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: belena53@mail.ru, tishkov@biodat.ru, mvaisfeld@mail.ru*

An overview assessments of landscape changes in the Arctic zone of the Russian Federation (AZRF) and their influence on the productivity of vegetation cover were conducted in 2014–2015 with the use of remote methods (remote sensing) and field studies. Multi-scale, multi-temporal and multi-directional transformations of vegetation cover in terms of the synergism of influence of changing climate and economic activities were identified. It is shown that at the present stage the processes of growth of productivity (“greening”), which is regarded as the effect of the conjugate action of climate warming and economic development, and its reduction due to focal and frontal anthropogenic disturbances of soil and vegetation cover take place simultaneously. According to the synthesis of results of field observations, the direct and indirect influence of tundra greening on the number, distribution and migration of the mammals and birds of the Arctic is revealed. The conclusion about the irreversibility of some changes and about the directional growth of areas with a destabilized state of the biota was made.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, vegetation cover, biological productivity, vegetation index NDVI, the northern border of the forest zone, “greening,” “bushing,” “prairiefication” and “delichenisation” of tundra, biota’ trends.

doi:10.15356/0373-2444-2016-3-28-39