

УДК 581.55:58.056 (1-922.1)

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РАСТИТЕЛЬНЫЙ ПОКРОВ ОСТРОВОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

И. А. Лавриненко, О. В. Лавриненко

Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН

Для растительных сообществ островов Вайгач и Колгуев установлено повышение максимальных значений вегетационного индекса NDVI за последние два с половиной десятилетия на 30 и 15 % соответственно. «Позеленение» территории стало ответом растительности на потепление климата за последние 40 лет. Возрастание зеленой фитомассы тесно коррелирует с ростом средних летних температур, удлинением периода вегетации (в начале и в конце) и количеством накопленного за этот период тепла. Изменения температуры воздуха и ответ на них растительности были более слабыми на Колгуеве по сравнению с Вайгачом.

Ключевые слова: климатические изменения, растительность, вегетационный индекс NDVI, «позеленение» арктических островов.

I. A. Lavrinenko, O. V. Lavrinenko. THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE PLANT COVER OF THE BARENTS SEA ISLANDS

The maximum values of NDVI increased in the plant communities by 30 % on Vaigach Island and by 15 % on Kolguev Island over the past two and a half decades. "Greening" of the territory is a response of vegetation to climate warming over the last 40 years. The increase in green phytomass closely correlates with the rise in average summer temperatures, elongation of the growing season (at the beginning and in the end), and the amount of accumulated heat. Changes in air temperature and the feedback from vegetation were weaker on Kolguev than on Vaigach.

Key words: climate change, vegetation, NDVI, «greening» of the Arctic islands.

Введение

Состояние растительного покрова отражает характер и интенсивность влияния природно-климатических факторов на определенный участок земной поверхности и является индикатором такого влияния. Динамика растительности определяется многообразием воздействующих факторов (главным из которых в условиях Арктики является количество тепла) и проявляется через изменение состава и структуры сообществ (проективного покрытия, числа и оби-

лия видов и жизненных форм растений) в пределах геоботанических контуров, а также границ самих контуров.

Ранее нами [Лавриненко, Лавриненко, 2004] был обобщен материал по фитоиндикации изменений климата на территории северо-востока европейской части России. К чувствительным индикаторам были отнесены положение северной границы экотона тайга – тундра и границы распространения отдельных видов растений (ели сибирской и сопутствующих ей видов бореального комплекса, антропофитов и водных макрофитов).

Изменения в тундровых сообществах под влиянием климата показаны прежде всего для североамериканского сектора Арктики [Sturm et al., 2001]. Получаемые со спутников изображения земной поверхности свидетельствуют о возрастании за последние десятилетия усредненного значения нормализованного разностного вегетационного индекса (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), отражающего степень «озеленения» территории, что обусловлено увеличением продолжительности вегетационного периода [Slayback et al., 2003].

Большим коллективом авторов [Bhatt et al., 2010; Walker et al., 2010], проанализировавших данные спутниковых съемок за период с 1982 по 2008 год, установлено, что в высоких широтах Канадской Арктики, Северной Аляски и Западной Гренландии рост максимальных значений NDVI достигал 15 %. Увеличение NDVI авторы связали с потеплением, обусловленным разрушением ледового покрова в 50-километровой зоне вдоль берега.

Тенденции, выявленные при анализе спутниковых данных, были подтверждены долговременными наземными исследованиями 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 [Hudson, Henry, 2009; Hill, Henry, 2010]. Эти изменения, по мнению авторов, были ответом на повышение температуры воздуха за последние 35 лет. Возрастанию фитомассы сопутствовало увеличение продолжительности вегетационного периода (его удлинение в конце лета) и более глубокое протаивание активных слоев почвы.

Анализ состава и структуры растительных сообществ на 160 мониторинговых площадках в тундрах Аляски в течение 20 лет (с 1989 по 2008 гг.) позволил установить увеличение проективного покрытия и высоты растительного покрова, усложнение структуры сообществ, а также повышение относительного обилия трав при снижении – лишайников и мхов [Gould et al., 2009]. Эти изменения авторы объяснили возрастанием температуры почвы, таянием вечной мерзлоты, улучшением снабжения растений водой и питательными веществами.

В свете тенденций динамики растительности в тундровой зоне американского континента особый интерес представляет выявление подобных изменений на территории европейской части Российской Арктики.

Цель работы – оценить с помощью методов дистанционного зондирования степень «озеленения» территории островов Колгуев и Вайгач в период с 80-х годов прошлого столетия до настоящего времени и выявить взаимосвязь с динамикой температуры воздуха.

Материалы и методы

Колгуев и Вайгач – типичные шельфовые острова. Первый расположен в юго-восточной части Баренцева моря между 68°41' и 69°30' с. ш. и 48°12' и 50°18' в. д., второй находится севернее и восточнее – между 69°40' и 70°28' с. ш. и 58°25' и 60°30' в. д. и омывается с запада водами Карского, а с востока – более теплого Баренцева моря (рис. 1). Площадь Колгуева 5020 км², от побережья материка он отделен проливом шириной 70 км, Вайгача – 3383 км², от материка он отделен более узким проливом – 4–11 км.

Колгуев целиком образован четвертичными отложениями (суглинками и глинами). Центральная часть острова холмистая, наивысшая отметка 173 м¹. Большую часть поверхности занимает морская аккумулятивная равнина, охватывающая террасы с высотами 30–50 м и 50–80 м. На юге и севере острова выделяется терраса с высотами 8–20 м, к которой приурочена прибрежная болотная аккумулятивная равнина, так называемая «лапта» [Атлас..., 1976]. Согласно схеме широтной дифференциации растительного покрова Арктики, северо-западная и центральная части Колгуева лежат в пределах подзоны северных (или типичных) тундр, а южная и восточная – подзоны южных [Растительность..., 1980].

На Вайгаче мощность четвертичных отложений незначительна (от нескольких до десятков метров), часты выходы на поверхность коренных пород. В рельефе преобладают грядовые возвышенности, сложенные палеозойскими песчаниками, глинистыми сланцами, глинистыми и песчанистыми известняками. На севере абсолютные высоты достигают 157 м, на юге гряды более низкие (100–130 м). Они постепенно, террасами от 70–60 до 40–30 м понижаются к берегам острова и окаймлены узкой полосой прибрежной равнины, обычно обрывающейся к морю 10–15-метровым уступом [Атлас..., 1985]. На равнине до отметок 70 м развиваются сообщества типичных тундр, на грядовых возвышенностях – орографические и эдафические варианты арктических тундр [Растительность..., 1980].

¹ Здесь и далее – над уровнем моря.



Рис. 1. Расположение островов Колгуев и Вайгач в Баренцевом море; метеостанции, данные по которым используются в статье: 1 – «Колгуев северный»; 2 – «Бугрино»; 3 – «Им. Е. К. Федорова»; 4 – «Амдерма»; ключевые участки выделены рамками

Согласно агроклиматическому районированию территории Ненецкого автономного округа (НАО), Колгуев расположен в западном, Вайгач – в восточном подрайоне субарктического района, который характеризуется продолжительной и холодной зимой, коротким и прохладным летом, большой облачностью, туманами, частыми метелями и сильными ветрами, высокой относительной влажностью воздуха круглый год; суровость климата усиливается с запада на восток [Агроклиматические условия..., 1986].

Для характеристики локального климата островов нами использованы данные по метеостанциям: «Колгуев северный» (индекс по каталогу ВМО 22095), расположенной на севере острова, и «Бугрино» (22193) – на юге, «Им. Е. К. Федорова» (20946) – на севере Вайгача и «Амдерма» (23022) – вблизи южной оконечности острова на побережье материка (см. рис. 1).

Информацию о среднесуточных температурах получили с сайта правительства США [NOAA...]: для метеостанций «Колгуев северный» и «Бугрино» за период с 1959 по 1999 год, «Им. Е. К. Федорова» – с 1964 по 1994 год и «Амдерма» – с 1948 по 2010 год. Значения градусов в Фаренгейтах переводили в градусы Цельсия по формуле: $t\text{ }^{\circ}\text{C} = (t\text{ }^{\circ}\text{F} - 32) \square 5/9$. Данные с сайта NOAA использовали для расче-

та длительности периода с положительными температурами, суммы положительных температур и установления дат перехода через 0 °С. На Российском гидрометеорологическом портале [ВНИИГМИ-МЦД] доступна информация о среднемесячных температурах воздуха по метеостанциям «Им. Е. К. Федорова» – с 1959 по 2009 год, «Амдерма» – с 1940 по 2009 год и «Колгуев северный» – с 1934 по 2009 год. Эти данные характеризуются более длительным периодом наблюдений, их применяли (дополнив данными с сайта NOAA) для построения температурных трендов.

Аномалии температуры воздуха рассчитывали как отклонения от средних за рекомендованный ВМО базовый период 1961–1990 гг.

Для построения температурных трендов были использованы методы линейной регрессии и скользящей средней. Последний применяется для характеристики тенденции развития исследуемой статистической совокупности и основан на расчете средних уровней ряда за определенный период; с его помощью можно выявить циклические колебания.

Изучение многолетней динамики растительного покрова проводили с использованием методов дистанционного зондирования и полевого дешифрирования спутниковых снимков. Для

этого на сайте United State Geological Survey [United...] были отобраны 28 доступных для обработки многозональных космических снимков спутников Landsat 4–7 за период 1984–2010 гг. по Вайгачу и 20 снимков спутников Landsat 4–5 за период 1986–2011 гг. по Колгуеву. С применением каналов видимой красной (К) и ближней инфракрасной частей спектра (ИК) рассчитывали нормализованный вегетационный индекс, отражающий запасы зеленой фитомассы (травы, листья кустарников и кустарничков, зеленые мхи) и содержание хлорофилла в растениях: $NDVI = (ИК - К) / (ИК + К)$ [Walker et al., 2003]. Значения NDVI варьируют от -1 до +1;

вода, обнаженный субстрат и почва имеют нулевые значения и ниже, растительный покров – положительные. Для изучения внутрисезонной динамики зеленой фитомассы использовали спутниковые снимки, сделанные в период с июня по сентябрь, соответствующие разным этапам вегетации (начало – пик – конец).

Полевое дешифрирование и типология растительности выполнены по результатам экспедиционных работ на о. Колгуев в 2005 и 2007 гг., Вайгач – в 2004 и 2010 гг.

Сравнительный анализ запасов зеленой фитомассы на основе NDVI проводили на ключевых участках, охватывающих большинство

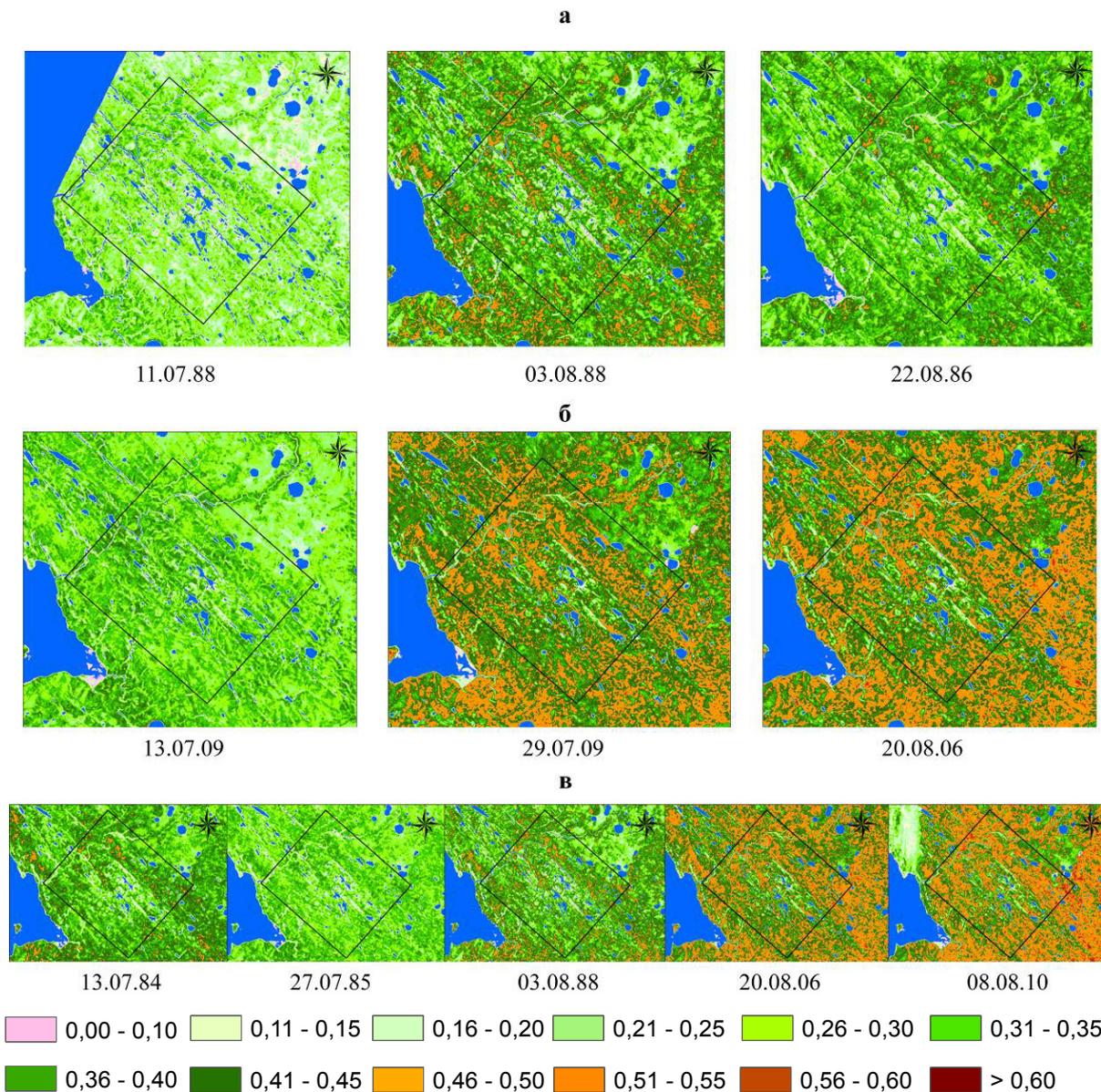


Рис. 2. Динамика NDVI на ключевом участке о. Вайгач: а – в течение вегетационного периода в 1986–1988 гг.; б – в течение вегетационного периода в 2006–2009 гг.; в – межгодовая для периода максимального накопления зеленой фитомассы. Значения NDVI:

типов сообществ – от высокопродуктивных зарослей ивняков до малопродуктивных кустарничково-лишайниковых сообществ на скальных и песчаных обнажениях. На Колгуеве ключевой участок размером 10 × 20 км был расположен в восточной части острова, на Вайгаче – 10 × 10 км – в юго-западной (см. рис. 1). Максимальные значения NDVI рассчитывали как средние для ключевого участка в период накопления максимальной зеленой фитомассы.

Результаты и обсуждение

Сезонная и межгодовая динамика NDVI на о. Вайгач

Несмотря на значительные ограничения для анализа (отсутствие снимков за определенные периоды, полная или частичная облачность), обработка доступных снимков и сравнительный анализ показателей NDVI по ключевому участку о. Вайгач позволили выявить следующие тенденции:

1. Произошел сдвиг срока накопления максимальной зеленой фитомассы (пик вегетации) с конца июля – начала августа в восьмидесятых годах прошлого века на вторую декаду августа в первом десятилетии текущего века.

На спутниковых снимках видно, что в 1986–1988 гг. пик вегетации приходился на начало августа, а во второй половине августа значения NDVI снижались (рис. 2, а), в 2006–2009 гг. – на вторую половину августа, когда значения NDVI были наиболее высокими (рис. 2, б).

2. Продолжительность активной вегетации в первом десятилетии текущего столетия увеличилась примерно на 2 недели по сравнению с восьмидесятыми годами прошлого.

На снимках 2006–2009 гг. значения NDVI, равные 0,4 и выше, сохранялись до конца августа, тогда как на снимках 1986–1988 гг. значения NDVI в начале августа составляли 0,3–0,5, а к концу августа снижались (см. рис. 2, а, б).

3. Спутниковые снимки, сделанные в пик вегетации в период с 1984 по 2010 год, показывают, что за последние два с половиной десятилетия произошло увеличение значений NDVI на подавляющем большинстве геоботанических контуров.

Если в период с 1984 по 1988 год максимальные значения NDVI (средние для ключевого участка в пик вегетации) варьировали от 0,16 до 0,32, то в 2006–2010 гг. они были равны 0,39–0,42 (рис. 2, в).

4. В пределах ключевого участка в период с 1986 по 2010 год установлен сдвиг кривой рас-

пределения площадей с разными значениями NDVI (от 0,00 до > 0,60) в сторону увеличения доли площадей с более высокими значениями вегетационного индекса (рис. 3, а). При этом модальные значения NDVI увеличились от 0,30–0,35 до 0,45–0,50.

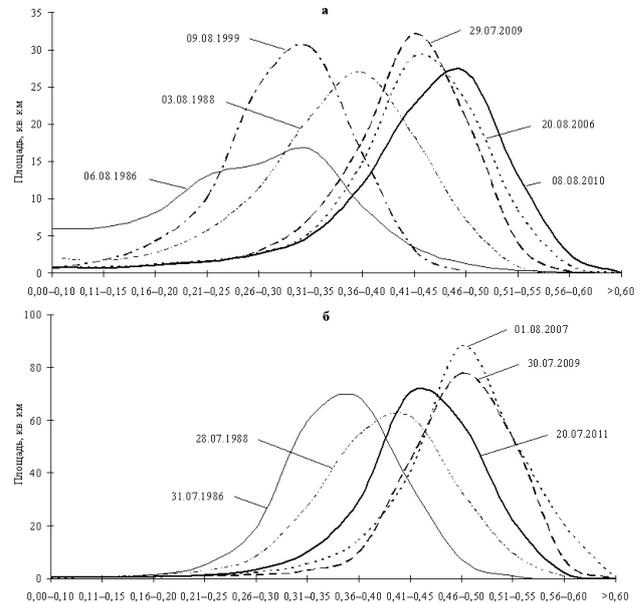


Рис. 3. Динамика распределения площадей с разными значениями NDVI в пределах ключевого участка островов: а – Вайгач в период с 1986 по 2010 гг.; б – Колгуев в период с 1986 по 2011 гг.; NDVI со значениями < 0 в график не включены

Рост запасов зеленой фитомассы в пределах ключевого участка произошел, по-видимому, как за счет увеличения обилия и проективного покрытия (ПП) трав, кустарников, кустарничков и зеленых мхов в пределах отдельных геоботанических контуров, так и вследствие увеличения площади более «зеленых» контуров.

5. Несмотря на межгодовые колебания вегетационного индекса, тенденция нарастания зеленой фитомассы за последние 25 лет прослеживается во всех типах растительных сообществ.

На о. Вайгач при полевом дешифрировании спутниковых снимков в пределах ключевого участка было выделено 11 типов растительных сообществ [Лавриненко, Лавриненко, 2010]. В период с 1986 по 2010 год средние значения NDVI в пик вегетации увеличились в разных типах – от сообществ с разреженным (ПП менее 20 %) растительным покровом на наиболее высоких элементах рельефа до сомкнутых (100 %) зарослей кустарников и осоково-моховых болот в понижениях рельефа (рис. 4, а).

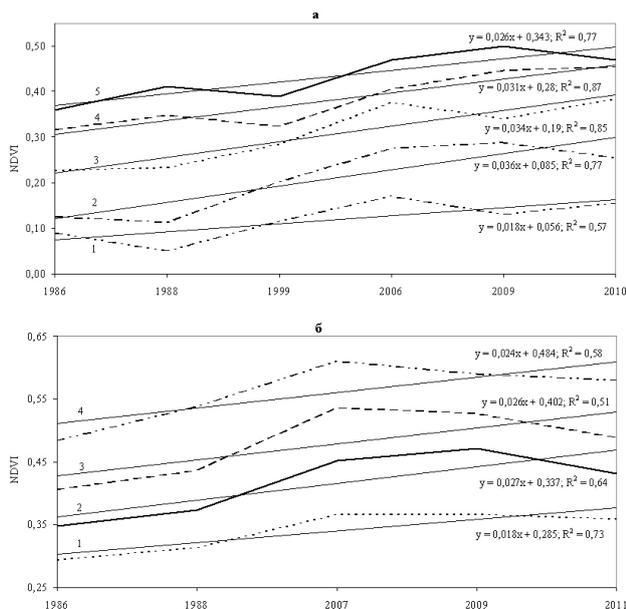


Рис. 4. Динамика максимальных значений NDVI для разных типов растительных сообществ на островах: а – Вайгач, где 1 – смолевково (*Silena acaulis*)-дриадовые и ивово (*Salix polaris*, *S. reticulata*)-дриадовые тундры на щебнистых грунтах, ПП менее 20 %, 2 – осоково (*Carex misandra*, *C. rupestris*)-дриадовые тундры, ПП 30–60 %, 3 – редкоивовые (*Salix arctica*) осоково (*Carex arctisibirica*, *C. rariflora*)-моховые тундры, иногда с пятнами-медальонами, ПП 80–100 %, 4 – ивняки низкорослые из *Salix lanata* травяно-моховые, ПП 100 %, 5 – разнотравно-осоково (*Carex stans*)-моховые заболоченные сообщества с ивой (*Salix lanata*, *S. reptans*), ПП 100 %; б – Колгуев, где 1 – пятистиевые кустарничковые (*Arctous alpina*, *Empetrum hermaphroditum*) тундры на песках, ПП 30–60 %, 2 – кустарничково-лишайниковые тундры на песках, ПП 80–100 %, 3 – ивово-кустарничково (*Empetrum hermaphroditum*, *Salix herbacea*, *Vaccinium vitis-idaea*)-моховые тундры с пятнами-медальонами, ПП 60–80 %, 4 – ивняки (*Salix glauca*, *S. lanata*) разнотравно-моховые, осоково-моховые и разнотравные, ивово-луговые и луговые сообщества, ПП 100 %. На рисунках приведены уравнения линейной регрессии и величины достоверности аппроксимации (R^2)

Сезонная и межгодовая динамика NDVI на о. Колгуев

Из-за отсутствия спутниковых снимков хорошего качества за август (безоблачных) для о. Колгуев не удалось оценить динамику продолжительности вегетационного периода. Другие тенденции, установленные в результате сравнительного анализа показателей NDVI по ключевому участку, были такими же, как и для о. Вайгач:

1. Произошел сдвиг пика вегетации с середины – второй половины июля в восьмидесятых годах прошлого века на начало – первую половину августа в первом десятилетии текущего столетия.

На спутниковых снимках видно, что в 1984–1988 гг. запасы зеленой фитомассы были максимальными в середине июля (рис. 5, а), тогда как в 2007–2009 гг. пик вегетации и максимальные значения NDVI зафиксированы в начале августа (рис. 5, б).

2. Спутниковые снимки, сделанные в пик вегетации в период с 1986 по 2011 год, показывают, что за последние два с половиной десятилетия произошло увеличение значений NDVI на подавляющем большинстве контуров.

Если в 1986–1988 гг. в пик вегетации преобладали контуры растительности с максимальными значениями NDVI от 0,40 до 0,44, то в 2007–2011 год доминировали контуры с более высокими значениями – 0,48–0,52 (рис. 5, в).

3. В пределах ключевого участка в период с 1986 по 2011 год установлен сдвиг кривой распределения площадей с разными значениями NDVI (от 0,00 до >0,60) в сторону увеличения доли площадей с более высокими значениями вегетационного индекса (рис. 3, б). При этом модальные значения NDVI увеличились от 0,35–0,40 до 0,45–0,50.

4. Тенденция нарастания зеленой фитомассы в период с 1986 по 2011 год прослеживается в разных типах растительных сообществ (рис. 4, б).

Выявленные тенденции означают, что за последние два с половиной десятилетия произошло «позеленение» территории островов Вайгач и Колгуев за счет возрастания обилия, проективного покрытия и продуктивности жизненных форм растений с зелеными надземными частями. Для того чтобы понять, является ли это ответом на климатические изменения, рассмотрим динамику температуры воздуха и продолжительности вегетационного периода на островах.

Динамика температуры воздуха на островах Вайгач и Колгуев

Ход кривых среднегодовой температуры воздуха по метеостанциям «Амдерма» и «Им. Е. К. Федорова» в целом совпадает (рис. 6, а), однако климат в Амдерме немного холоднее, чем на севере Вайгача (среднегодовая температура –6,6 и –6,4 °С соответственно). Это может объясняться тем, что северной части Вайгача достигает атлантическое Нордкапское течение (одна из ветвей Гольфстрима). Высокое совпадение кривых позволяет нам в дальнейшем использовать данные по метеостанции «Амдерма», на которой велись более длительные наблюдения (с 1940 по 2010 год), для характеристики трендов изменения климата на о. Вайгач. За 70-летний период наблюдений линейный тренд повышения среднегодовой температуры воздуха отсутствовал.

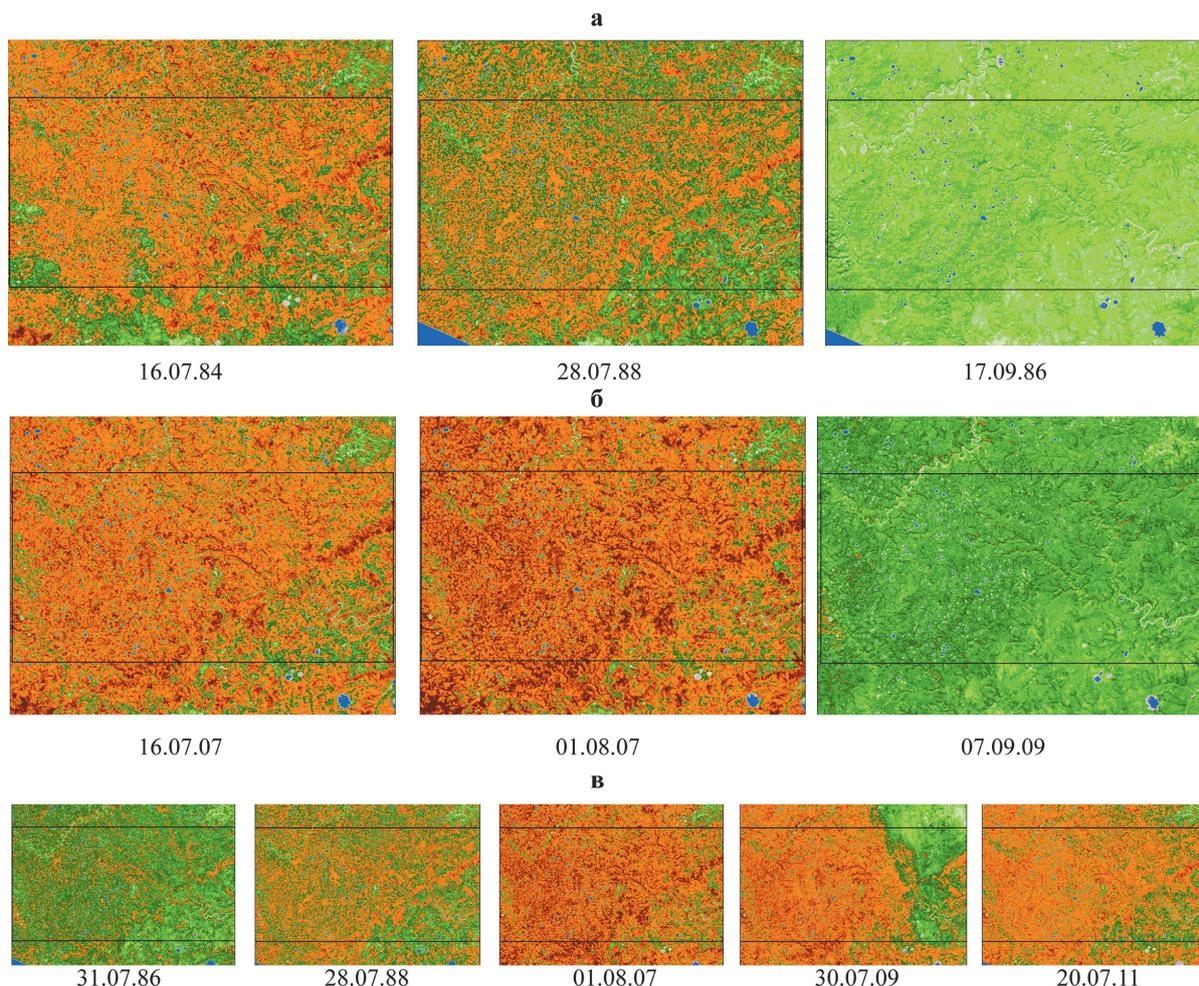


Рис. 5. Динамика NDVI на ключевом участке о. Колгуев: а – в течение вегетационного периода 1984–1988 гг.; б – в течение вегетационного периода 2007–2009 гг. (на снимке за 30.07.2009 г. в верхней части справа присутствует облачность); в – межгодовая для периода максимального накопления зеленой фитомассы; значения NDVI как на рис. 2

По обеим метеостанциям на о. Колгуев ход кривых среднегодовой температуры воздуха в целом совпадает, несмотря на ограниченное количество данных по «Бугрино» (рис. 6, б). Несколько более теплый климат на севере острова обусловлен тем, что теплое Нордкапское течение разделяется им на две струи: с севера остров огибает основное Колгуевско-Новоземельское течение, с юга – более слабое Канинское. Для метеостанции «Колгуев северный», так же как для «Амдермы», имеется длительный ряд наблюдений за среднегодовой температурой воздуха (76 лет) и не установлено какого-либо положительного линейного тренда.

Среднегодовая температура воздуха на Колгуеве за весь период измерений варьировала от $-6,4$ до $-0,2$ °С при средней многолетней $-2,7$ °С, на Вайгаче – от $-10,4$ до $-2,7$ °С при средней многолетней $-6,4$ °С, т. е. на Колгуеве среднегодовые температуры примерно на 4 °С выше, чем на Вайгаче.

Кривые сглаживания рядов среднегодовых температур воздуха с 7-летним периодом (7 ЛСС) для метеостанций «Колгуев северный» и «Амдерма» имели сходный циклический характер (рис. 7). Природу таких циклов, как правило, связывают с изменением солнечной активности [Lassen, Friis-Christensen, 1995; Damon, Peristykh, 1999; Терез, 2004]. В настоящее время кривые 7 ЛСС, по-видимому, достигли пика.

Если мы рассмотрим температурные данные за период длиной 40 лет (с 1970-х до 2010-х гг.), то для всех метеостанций установлен положительный линейный тренд, более выраженный для Вайгача (коэффициент регрессии для метеостанции «Им. Е. К. Федорова» равен 0,042, «Амдерма» – 0,054) и чуть слабее – для Колгуева (0,035) (см. рис. 6). Вслед за З. М. Гудкович с соавт. [2005] можно предположить, что этот период является локальной фазой потепления более длительного 60-летнего цикла естественного колебания температуры.

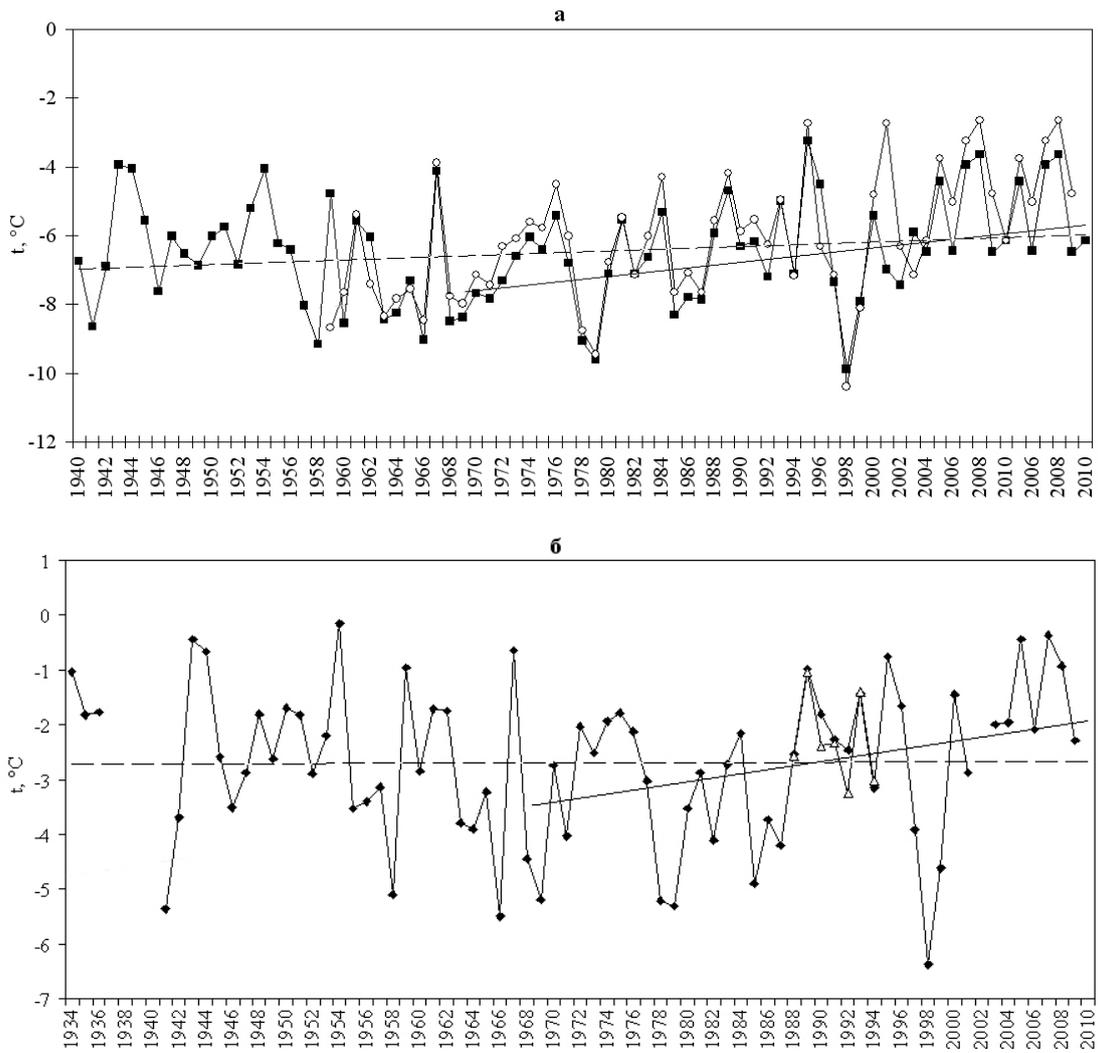


Рис. 6. Кривые показателей среднегодовой температуры воздуха для метеостанций: а – «Им. Е. К. Федорова» (белые кружки) и «Амдерма» (черные квадраты); б – «Колгуев северный» (черные ромбы) и «Бугрино» (белые треугольники); линейные тренды для кривых «Амдерма» и «Колгуев северный» за весь период наблюдений показаны пунктирными линиями, за 40-летний период (1970–2010 гг.) – сплошными

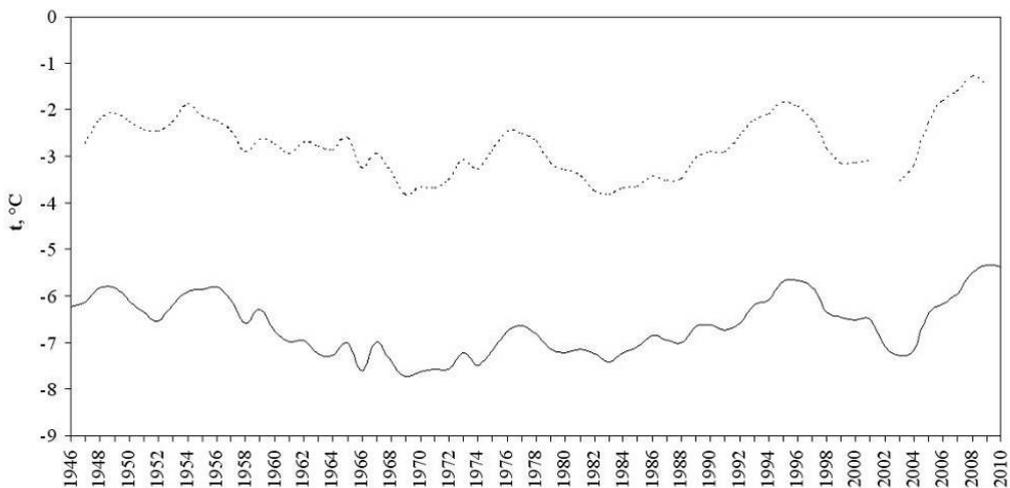


Рис. 7. Кривые сглаживания рядов среднегодовых температур воздуха с 7-летним периодом для метеостанций «Амдерма» (сплошная линия) и «Колгуев северный» (пунктирная)

Первое потепление в XX столетии, особенно сильное в высоких широтах Северного полушария, наблюдалось между 1910 и 1940 гг., после чего произошло определенное похолодание. В конце 1940-х годов отмечалось понижение температуры, которое также было наиболее значительным в Арктике. При этом изменение температуры было больше заметно в холодное время года, чем в теплое. Начиная с зимы 1970–1971 гг. ранее преобладавшая тенденция к падению температуры сменилась тенденцией к потеплению. С 1970-х годов происходило особо быстрое потепление, составляющее (линейный тренд) $+1,75$ °C/100 лет для земного шара и $+2,17$ °C/100 лет для Северного полушария. Для европейской части России скорость потепления после 1975 г. также была много больше, чем за столетие в целом – это $0,49$ °C/10 лет против $0,08$ °C/10 лет [Оценочный доклад..., 2008]. В НАО изменение среднегодовой температуры за последние 35 лет практически совпадает со средним для России и составляет примерно $1,5$ °C, что в 2 раза выше, чем для мира в целом [Груза, Ранькова, 2012].

Среди климатологов существует мнение [Кононова, 2010], что в настоящее время происходит смена тенденции колебания температуры воздуха – быстрое потепление 80–90-х гг. прошлого столетия закончилось. По данным И. Е. Фролова с соавт. [2010], в начале XXI века в ходе изменений температуры воздуха, ледовитости арктических морей и ряде показателей общей циркуляции атмосферы наметился перелом в сторону похолодания климата. Наименьших за последний век значений ледовитости северной полярной области достигла в 2007 г., после чего она начала расти. Причиной колебаний ледовитости, температуры воздуха, осадков и, как результат, увеличения повторения опасных природных явлений в различных регионах Северного полушария являются колебания длительности атмосферных процессов циркуляции [Кононова, 2010].

На Вайгаче (по данным метеостанций «Амдерма» и «Им. Е. К. Федорова») наиболее теплыми были 1995 и 2008 гг., когда аномалии среднегодовых температур составили от $+3,7$ до $+4,1$ °C, чуть менее теплыми – 1943, 1954, 1967 и 2007 гг. (от $+2,8$ до $+3,5$ °C). На Колгуеве наиболее теплые годы совпали с такими на Вайгаче, но положительные аномалии были ниже и варьировали от $+2,4$ до $+3,0$ °C. Последние 2 года (2009 и 2010 гг.) по уровню аномальности температурного режима были «незначительно теплее нормы», как и в целом для территории России [Доклад..., 2011].

Зимы на Колгуеве значительно теплее, чем на Вайгаче, – средние многолетние температуры за три зимних месяца (декабрь–февраль) отличаются на 7 °C. В динамике с 1930–1940 гг. до настоящего времени линейный тренд зимних температур для метеостанции «Амдерма» отсутствовал, для «Колгуев северный» был слабый отрицательный (коэффициент регрессии $-0,013$).

Различия в средних температурах за три летних месяца (июнь–август) между Колгуевом и Вайгачом не столь существенны – средние многолетние на Колгуеве выше на $0,9$ °C. При этом и для Вайгача, и для Колгуева можно отметить положительный линейный тренд: для метеостанции «Амдерма» он был выражен более сильно (коэффициент регрессии за весь период наблюдений $0,014$, за последние 40 лет – $0,120$), чем для «Колгуев северный» ($0,009$ и $0,040$ соответственно).

Формирование зеленой фитомассы зависит от количества тепла, накопленного за период вегетации, которое, в свою очередь, определяется величинами среднесуточных температур и длительностью периода вегетации. Для арктических регионов за период вегетации можно принять временной промежуток с температурой выше 0 °C, поскольку здесь растения начинают фотосинтез и рост сразу при переходе к положительным температурам. Длительность периода с температурами выше 0 °C на метеостанциях «Амдерма» и «Им. Е. К. Федорова» различалась незначительно – в Амдерме в среднем 118 дней, на севере Вайгача – 121 (рис. 8, а). Для Колгуева данные по среднесуточным температурам воздуха доступны лишь за короткий промежуток с 1988 по 1994 гг. В этот отрезок времени здесь, по сравнению с Вайгачом, вегетационный период был более длительным (в среднем 138 дней).

На севере Вайгача (по данным метеостанции «Им. Е. К. Федорова») и юге («Амдерма») за примерно одинаковый по продолжительности период с температурой выше 0 °C накапливалось разное количество тепла – сумма активных температур на севере была ниже (среднее многолетнее 480 градусов), чем на юге (620 градусов). На Колгуеве за непродолжительный период наблюдений, по которому имеются данные, за период вегетации тепла накапливалось еще больше – в среднем 820 градусов (рис. 8, б).

Оба показателя – и длительность периода с положительными температурами, и сумма накопленного за этот период тепла – характеризовались цикличностью и в то же время имели положительный линейный тренд (см. рис. 8). За 50-летний период наблюдений на метеостан-

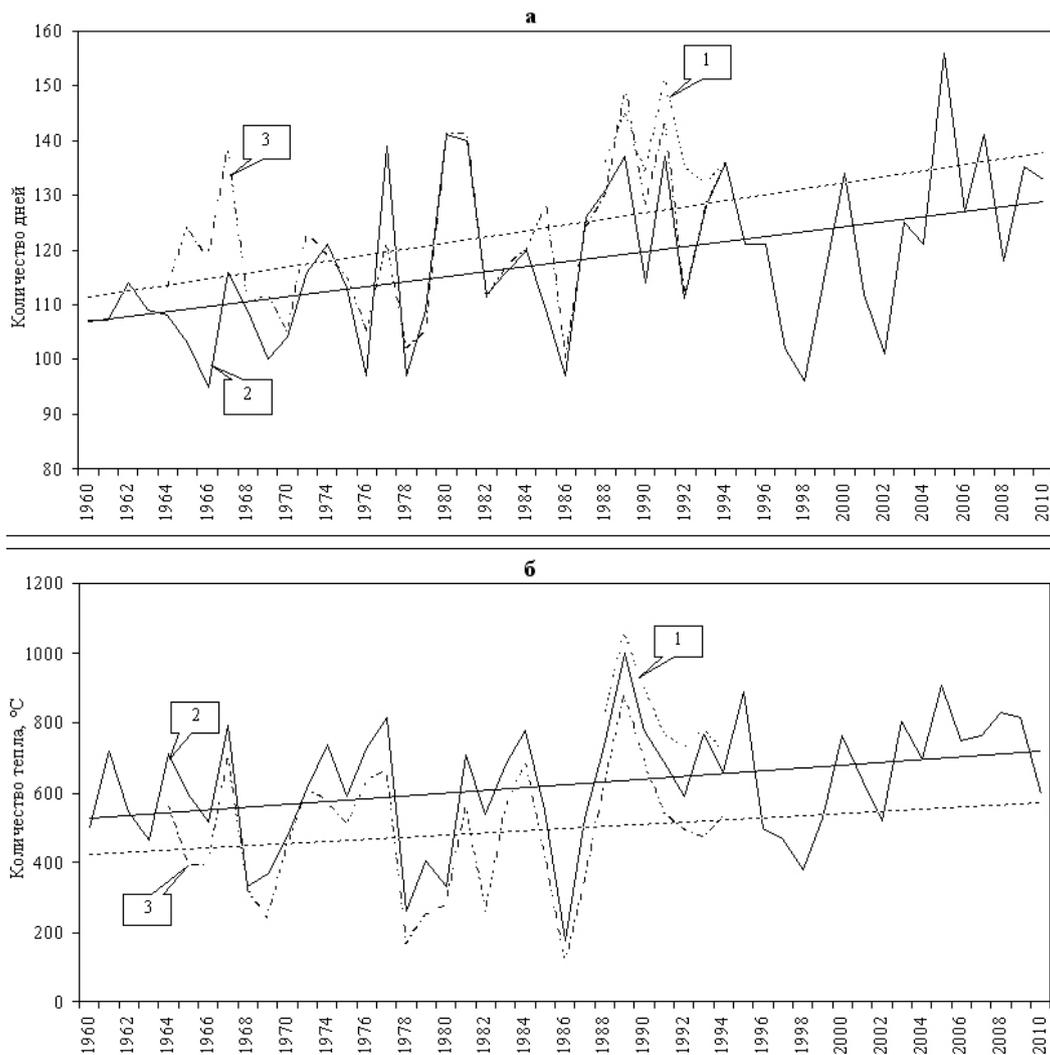


Рис. 8. Длительность периода с температурой выше 0 °С (а) и сумма активных температур, накопленная за этот период (б), на метеостанциях «Колгуев северный» (1), «Амдерма» (2) и «Им. Е. К. Федорова» (3) в динамике и линейные тренды для кривых «Амдерма» (сплошная линия) и «Им. Е. К. Федорова» (пунктирная)

ции «Амдерма» (1960–2010 гг.) коэффициент линейной регрессии для длительности периода с положительными температурами был равен 0,46, а для суммы активных температур – 3,96. За 30-летний период на метеостанции «Им. Е. К. Федорова» (1964–1994 гг.) эти коэффициенты составили 0,55 и 3,05 соответственно. То есть за 50 лет на юге Вайгача период с температурами выше 0 °С удлинился в среднем на 23 дня (со 106 до 129), при этом тепла стало накапливаться больше примерно на 200 градусов (с 520 до 720). На севере острова за 30 лет эти значения составили 16 дней (со 113 до 129) и 100 градусов (с 420 до 520). К сожалению, для Колгуева, из-за отсутствия данных за более длительный срок, выявить тренды не представилось возможным.

Даты устойчивого перехода температур через 0 °С весной и осенью по метеостанциям

«Амдерма» и «Им. Е. К. Федорова» в целом совпадали. Удлинение периода с температурой выше 0 °С происходило в равной мере как за счет более раннего перехода к положительным температурам весной (коэффициент линейной регрессии равен –0,21), так и за счет более позднего перехода к отрицательным температурам осенью (0,26) (рис. 9).

Данные климатологов также подтверждают расширение границ теплого времени года, наблюдаемое в последние годы в НАО. В частности, по сравнению с периодом 1961–1990 гг. в 2010 году на 9–15 суток раньше шло весеннее вскрытие рек, а замерзание наступило позже на 9–20 дней. В 2011 г. ситуация повторилась: в центральной и восточной частях округа вскрытие рек прошло более чем на 2 недели раньше, а осенью реки опять встали на 10–15 дней позже [Груза, Ранькова, 2012].

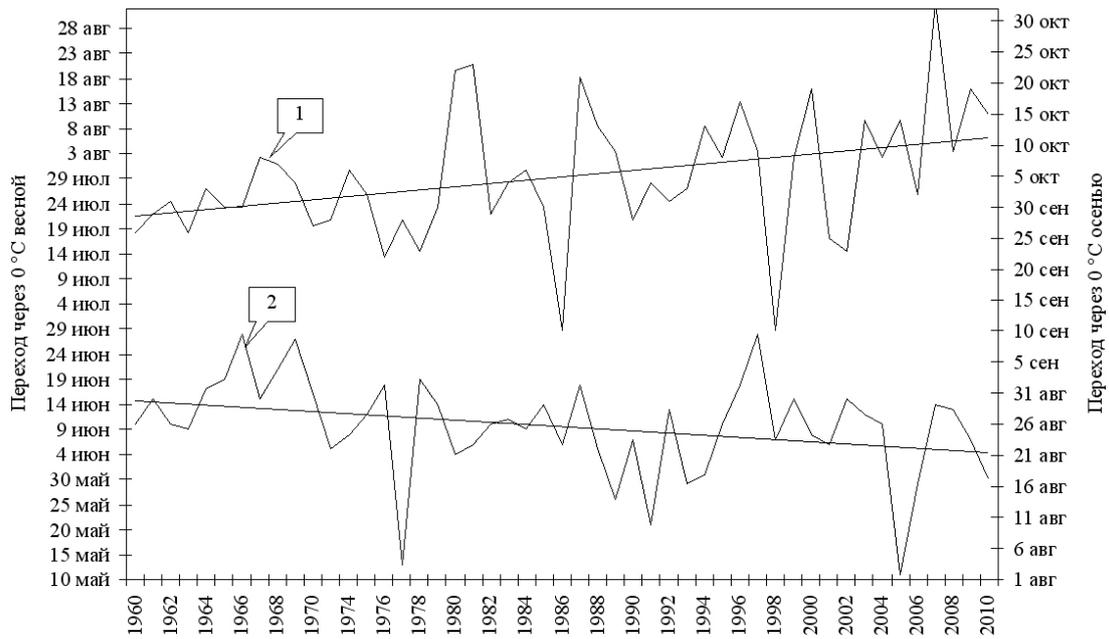


Рис. 9. Кривые перехода среднесуточной температуры через 0 °С осенью (1) и весной (2) и линейные тренды этих кривых (на примере метеостанции «Амдерма»)

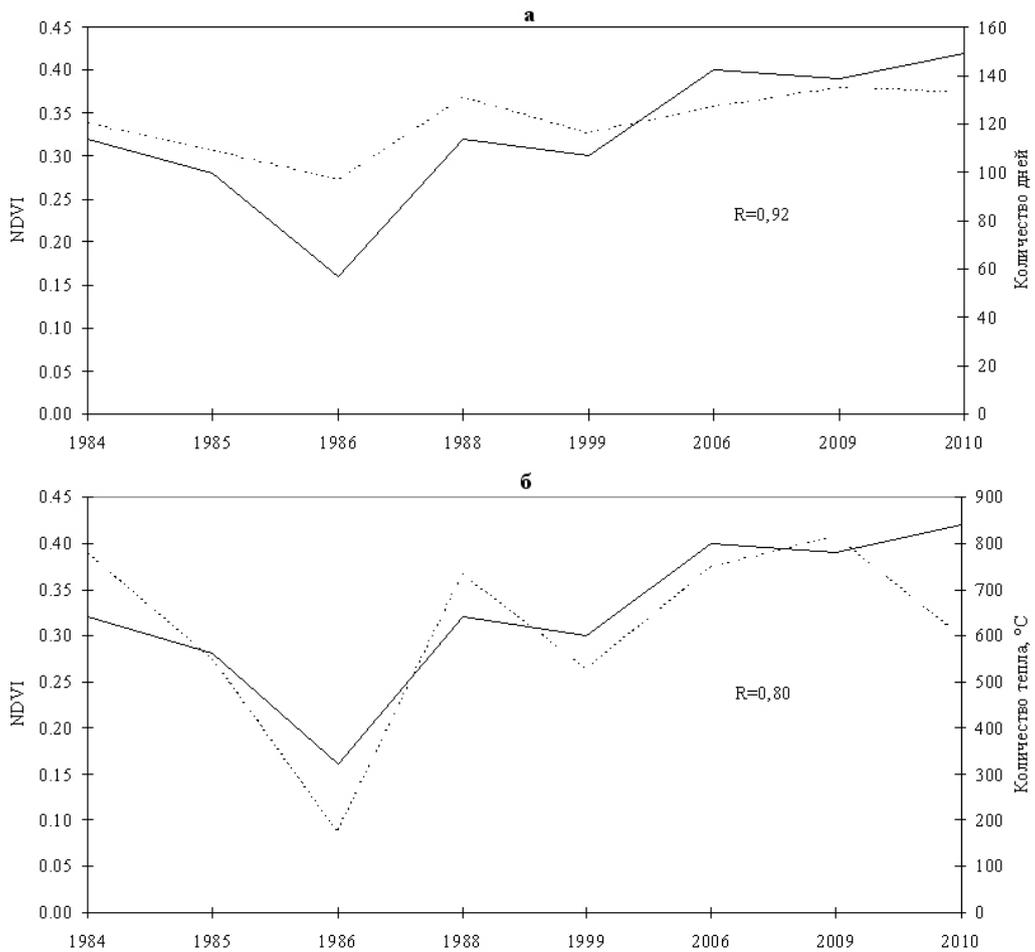


Рис. 10. Динамика максимального значения NDVI (сплошные линии) и а – длительности периода с температурой выше 0 °С (пунктирная), б – суммы активных температур за период с температурой выше 0 °С (пунктирная) на ключевом участке о. Вайгач

Взаимосвязь значений вегетационного индекса с климатическими характеристиками

В период с 1986 по 2010 год между максимальными значениями вегетационного индекса и показателями средней летней температуры установлена сильная положительная взаимосвязь: для о. Вайгач коэффициент корреляции равен 0,85, для Колгуева – 0,79. Такая же сильная взаимосвязь выявлена, на примере Вайгача, между максимальным значением NDVI и длительностью периода с температурой выше 0 °C ($R = 0,92$) (рис. 10, а) и между максимальным значением NDVI и суммой активных температур за этот период ($R = 0,80$) (рис. 10, б), т. е. можно заключить, что накопление зеленой фитомассы прямо зависело от количества тепла, накопленного за период вегетации.

Выводы

Существующие ряды данных по температуре воздуха на островах Вайгач и Колгуев свидетельствуют о циклическом характере ее изменений, по крайней мере в течение последних 70 и 76 лет. Мы придерживаемся точки зрения, что повышение температуры воздуха, начавшееся в 1970-х годах, является локальной фазой потепления более длительного цикла флуктуаций температуры в Арктике.

Процессы динамики растительного покрова под влиянием климатических изменений, установленные ранее для тундровой зоны североамериканского континента, характерны и для европейского сектора Арктики. Выявлено «позеленение» территории островов Вайгач и Колгуев за последние два с половиной десятилетия. На Вайгаче с середины 1980-х до 2010 гг. рост максимальных значений NDVI составил 30 %, на Колгуеве – 15 %. Повышение NDVI произошло как за счет увеличения запасов зеленой фитомассы (травы, листья кустарников и кустарничков, зеленые мхи) в разных типах растительных сообществ, так и вследствие расширения площадей более продуктивных сообществ, таких как ивняки и ивовые тундры.

Возрастание 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. Выявленные изменения в растительных сообществах обусловлены потеплением климата, имевшим место на протяжении последних 40 лет.

Происходящие на о. Вайгач изменения температуры воздуха и ответ на них растительности были более значительными, чем на о. Колгуев.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 13-04-01385) и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития».

Литература

Агроклиматические условия выпаса оленей на севере Коми АССР и в Ненецком автономном округе Архангельской области. Сыктывкар, 1986. 283 с.

Атлас Арктики // Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР. М., 1985. 204 с.

Атлас Архангельской области // Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР. М., 1976. 72 с.

Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата Российской Федерации: температура воздуха. Москва, ИГКЭ Росгидромета и РАН. 2012. 192 с.

Гудкович З. М., Карклин В. П., Фролов И. Е. Внутривековые изменения климата, площади ледяного покрова Евразийских арктических морей и их возможные причины // Метеорология и гидрология. 2005. № 6. С. 5–14.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 г. М.: Росгидромет, 2011. 66 с.

Кононова Н. К. Потепление или колебания климата? // Сборник научных работ XIV съезда Русского географического общества (Санкт-Петербург, 11–14 декабря 2010 г.). Книга 3. Климат, мировой океан и воды суши. Часть 1. 2010. С. 44–48.

Лавриненко О. В., Лавриненко И. А. Фитоиндикация изменений климата на северо-востоке европейской части России // География и природные ресурсы. 2004. № 2. С. 54–61.

Лавриненко И. А., Лавриненко О. В. Растительный покров острова Вайгач и индикация его изменений дистанционными методами // Природа шельфов и архипелагов Европейской Арктики. Комплексные исследования природы Шпицбергена: материалы международной научной конференции (Мурманск, 27–30 октября 2010 г.). М., ГЕОС, 2010. Вып. 10. С. 186–192.

Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Том 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 228 с.

Растительность европейской части СССР / С. А. Грибова, Т. И. Исаченко, Е. М. Лавренко (ред.). Л.: Наука, 1980. С. 29–69.

Российский гидрометеорологический портал (в тексте – ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://meteo.ru> (дата обращения: 02.02.2012).

Терез Э. И. Устойчивое развитие и проблемы изменения глобального климата Земли // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. 2004. Т. 17 (56), № 1. С. 181–205.

Фролов И. Е., Гудкович З. М., Карклин В. П., Смоляницкий В. М. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 52–61.

Bhatt U. S., Walker D. A., Reynolds M. K. et al. Circumpolar Arctic Tundra Vegetation Change Is Linked to Sea Ice Decline // *Earth Interactions*. 2010. Vol. 14, N 8. P. 1–20.

Gould, W. A., Mercado-Díaz J. A., Zimmerman J. K. Twenty year record of vegetation change from long-term plots in Alaskan tundra // Long Term Ecological Research Network All Scientists Meeting (Estes Park, 14–16 September 2009). 2009. Abstract C11C–0524.

Damon P. E., Peristykh A. N. Solar cycle length and 20th century northern hemisphere warming: revisited // *Geophysical Research Letters*. 1999. Vol. 26. P. 2469–2472.

Hill G. B., Henry G. H. R. Responses of High Arctic wet sedge tundra to climate warming since 1980 // *Global Change Biology*. 2010. N 17. P. 276–287.

Hudson J. M. G., Henry G. H. R. Increased plant biomass in a High Arctic heath community from 1981 to 2008 // *Ecology*. 2009. N 90. P. 2657–2663.

Kononova N. K. Long-term fluctuations of Northern Hemisphere atmospheric circulation according to Dzerdzhevskii's classification // *Geography, Environment, Sustainability Journal*. 2010. N 01 [3]. P. 25–43.

Lassen K., Friis-Christensen E. Variability of the solar cycle length during the past five centuries and the apparent association with terrestrial climate // *The Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1995. Vol. 57, N 8. P. 835–845.

NOAA Satellite and Information Service, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). URL: <http://www.ncdc.noaa.gov> (дата обращения: 02.02.2012).

Slayback D. A., Pinzon J. E., Los S. O., Tucker C. J. Northern hemisphere photosynthetic trends 1982–99 // *Global Change Biology*. 2003. N 9. P. 1–15.

Sturm M., Racine C., Tape K. Increasing shrub abundance in the Arctic // *Nature*. 2001. N 411. P. 546–547.

United State Geological Survey. URL: <http://glovis.usgs.gov> (дата обращения: 02.02.2012).

Walker D. A., Bhatt U. S., Comiso J. C. et al. The Arctic Report Card: Update for 2010. Vegetation. URL: <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard> (дата обращения: 08.12.2010).

Walker D. A., Epstein H. E., Jia G. J. et al. Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108, N D2, 8169, doi:10.1029/2001JD000986. P. 1–7.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лавриненко Игорь Анатольевич

старший научный сотрудник лаб. географии и картографии растительности, к. б. н.
Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
ул. Проф. Попова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 197376
эл. почта: lavrinenkoi@mail.ru
тел.: 89110254517

Лавриненко Ольга Васильевна

старший научный сотрудник лаб. растительности Крайнего Севера, к. б. н.
Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
ул. Проф. Попова, 2, Санкт-Петербург, Россия, 197376
эл. почта: lavrino@mail.ru
тел.: 89110254507

Lavrinenko, Igor

Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences
2 Professor Popov St., 197376 St. Petersburg, Russia
e-mail: lavrinenkoi@mail.ru
tel.: 89110254517

Lavrinenko, Olga

Komarov Botanical Institute, Russian Academy of Sciences
2 Professor Popov St., 197376 St. Petersburg, Russia
e-mail: lavrino@mail.ru
tel.: 89110254507