

Анализ влияния снеготаяния на межгодовую и сезонную динамику растительности в дельте реки Лены

К. И. Симонова

*Ботанический институт имени В. Л. Комарова РАН
Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: KSimonova@binran.ru*

Работа посвящена исследованию динамики растительного покрова в зависимости от сроков снеготаяния и температурного режима в дельте р. Лены на островах Самойловский и Курунгнах. Для изучения межгодовой и сезонной динамики снеготаяния и вегетации были проанализированы метеорологические данные и многозональные спутниковые снимки Landsat-8, Sentinel-2 и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за 2000–2018 гг. В ходе исследования была изучена межгодовая реакция растительных сообществ на условия окружающей среды в начале вегетационного периода в зависимости от времени снеготаяния и сопутствующей среднесуточной температуры воздуха. Также была изучена сезонная динамика встречающихся на участке исследования типов растительности. В результате проведённой работы отмечены характерные даты схода снега и температурные условия окружающей среды в период исследования. Выявлена средняя температура воздуха в течение 15 дней после схода снега для лет с ранним, средним и поздним снеготаянием (2000–2018), а также взаимосвязь суммы активных температур (САТ) и нормализованного относительного индекса растительности (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — NDVI). В годы с наименьшими значениями САТ наблюдались менее благоприятные условия среды, негативно сказывавшиеся на биомассе растительности в последующий год.

Ключевые слова: Арктика, динамика растительности, дистанционное зондирование, NDVI, снеготаяние

Одобрена к печати: 10.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-205-216

Введение

Арктика намного сильнее других регионов подвержена глобальному потеплению, скорость которого здесь в 2–3 раза выше, чем в других областях планеты (Allen et al., 2018). Начиная с 2010 г. были зарегистрированы 10 лет с самой высокой температурой за 143 года наблюдений (Monthly..., 2022). Исследования показывают, что на акваториях морей Северного Ледовитого океана вдоль восточного евразийского побережья сокращение ледового покрова составляет более 10 % в декаду (Ding et al., 2017; Perovich, 2011 и др.). Это явление способствует потеплению не только акваторий, но и прибрежных территорий Арктики (Bhatt et al., 2010, 2017).

Как следствие, во многих районах отмечается более ранний сход снегового покрова (Semmens et al., 2013; Wipf, 2010), что влечёт за собой разнящиеся последствия для регионов Арктики (Phoenix, Vjerke, 2016). Так, в одних регионах наблюдалось повышенное поглощение углерода и более высокая продуктивность в ранние и пиковые стадии развития растительности (Zona et al., 2022), в других регионах прослеживался отрицательный тренд индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) и сокращение продуктивности в целом (Bhatt et al., 2017; Gamon et al., 2013). Первое, так называемое «позеленение», связано с увеличением надземной зелёной биомассы в большинстве регионов Арктики — повышением количества кустарничков в видовом составе растительных сообществ. Второе, «побурение», — следствие отмирания или крайне сильного угнетения растительности, что зачастую связывают с периодическим воздействием крайне низкой температуры, деградацией многолетнемерзлых пород и другими факторами.

На основании результатов некоторых исследований прогнозируются значительные изменения в составе арктических растительных сообществ в будущем, среди которых распространение кустарничков и деревьев на северных территориях (Mod, Luoto, 2016; Pearson et al., 2013). Распространение кустарничков поспособствует растеплению многолетнемёрзлых пород, перераспределению снежного покрова по поверхности и накоплению большего количества опада (Loranty, Goetz, 2012; Vankoughnett, Grogan, 2016). Многие арктические виды рискуют оказаться угнетёнными как в результате воздействия климатических факторов (May et al., 2017), так и вследствие изменения видового состава растительных сообществ (Mod, Luoto, 2016).

Целью настоящих исследований было изучение влияния сроков снеготаяния и температуры воздуха на многолетнюю и сезонную динамику растительного покрова на основе анализа архивов климатических данных, серийного ряда многозональных спутниковых снимков и результатов полевых исследований.

Район исследований, материалы и методы



Рис. 1. Район исследований

Исследуемая территория островов Самойловский и Курунгнах расположена в центральной дельте р. Лены близ российско-германской научно-исследовательской станции (НИС) «Остров Самойловский» ($72^{\circ}22'$ с.ш., $126^{\circ}29'$ в.д.) (рис. 1).

Геоморфологическое строение дельты р. Лены представлено тремя террасами: первая включает пойменные образования и голоценовую террасу, сложенную алевритом и песком со значительной примесью органического вещества, вторая сложена песками о. Арга-Муора-Сисё и выступает типичной для западной части дельты, третья — флювиальными наносами, перекрытыми многолетнемёрзлыми породами (Schwamborn et al., 2002). На исследуемой территории о. Самойловский расположен в границах первой террасы (Voike et al., 2013), о. Курунгнах — в границах третьей (Morgenstern et al., 2013).

Для выполнения работы были использованы снимки спутников MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer — сканирующий спектро-радиометр среднего разрешения), Landsat-8 и Sentinel-2A (<https://www.usgs.gov/>), архив температуры воздуха НИС «Остров Самойловский» и пос. Тикси (2000–2018) (Voike et al., 2022; <http://www.aari.ru/main.php?sub=2&id=5>), а также ре-

зультаты классификации растительного покрова, подготовленные по материалам российско-немецкой экспедиции «Лена 2018», проведённой в 2018 г.

Растительные сообщества, описанные на 24 геоботанических площадках (30×30 м, острова Самойловский и Курунгнах), были отнесены к 8 типам растительности и формам ландшафта (табл. 1).

Таблица 1. Типы растительных сообществ и формы ландшафтов участка исследований (не опубликованы, переданы устно)

Количество площадок	Тип растительного сообщества	Форма ландшафта
2	Комплекс сухотравной тундры с влажными осоковыми сообществами с кустарничками (GSSh — Dry grass to wet sedge complex with shrubs)	Днище спущенного озера (хасырей)
2	Пойменные осоково-кустарничковые сообщества (SShF — Sedge-shrub associations on floodplain)	Пойма
1	Прибрежная растительность с преобладанием осоково-моховых сообществ (RSM — Riparian sedge-moss dominated vegetation)	Долина с гигрофильной растительностью
4	Низкокустарничково-травяная долина (ShGV — Low shrub-grass valley)	Долина с кустарничковой растительностью
1	Сухотравная тундра (DHT — Dry herb tundra)	Склон холма
3	Сухая кочкарная тундра (DTT — Dry tussock tundra)	Кочкарная тундра
8	Влажная осоково-моховая тундра (WSMT — Wet sedge-moss tundra)	Едомная возвышенность*
3	Полигональные тундровые комплексы с осоковой и моховой растительностью (PCT — Polygonal complex of sedge- and moss-dominated tundra)	Полигональная тундра

* Сильнольдистые (>50–90 % льда), как правило, богатые органическим материалом (>1–2 % органики), иловатые и пылеватые супесчаные и мелкопесчаные позднеэоценовые отложения; в долинах и дельтах рек могут содержать гравий и галечник (Васильчук, 2022).

В работе были использованы ежедневные показания температуры воздуха НИС «Остров Самойловский». Недостающие данные были восполнены показаниями метеорологической станции в пос. Тикси, расположенном в 110 км к востоку от участка исследований. Исходные данные содержали показания температуры воздуха за каждые 3 ч в период с 2000 по 2018 г. Обработка включала в себя вычисление средней, минимальной и максимальной температуры воздуха, а также подсчёт количества дней в определённом диапазоне температур.

Для визуальной регистрации процесса снеготаяния и изучения многолетней динамики растительного покрова дельты р. Лены были использованы 304 снимка MODIS за 2000–2018 гг. Такая процедура стала возможной благодаря частой периодичности проведения съёмки — 1–2 раза в сутки.

Динамика растительного покрова изучалась анализом показателей индекса NDVI для участка на влажной осоково-моховой тундре, приуроченной к едомной возвышенности. Это сообщество отличается постоянством видового состава и представлено крупными массивами на плоских участках со слабо выраженным микрорельефом. Учитывая низкое пространственное разрешение снимков MODIS, выбор этого участка позволил максимально снизить варьирование вегетационного индекса, обусловленного неоднородностью растительного покрова.

Взаимосвязь между сроками схода снегового покрова и сезонной динамикой растительности на разных формах рельефа изучалась на материалах снимков Landsat-8 и Sentinel-2A (май–август 2018 г.) анализом изменений индекса NDVI, извлечённых из пикселей, соответствующих расположению геоботанических площадок.

Снеготаяние

Для анализа сроков схода снегового покрова были использованы спутниковые снимки MODIS за 2000–2018 гг., впоследствии разделённые на три группы (табл. 2): раннее снеготаяние (Р, 17–25 мая), среднее (С, 2–10 июня) и позднее (П, 18 июня). При сопоставлении результатов получилось, что в течение исследуемого периода ранний сход снега в центральной

дельте Лены происходил в течение 6 лет из 19, средний — в течение 11 лет и поздний — в течение 2 лет, освобождая исследуемую территорию ко второй половине мая, первой или второй половине июня соответственно. Продолжительность снеготаяния определялась погодными условиями сезона. В годы с ранним сходом снега процесс занимал максимальное время (около 1 мес), территории освобождались от снегового покрова крайне медленно. В годы с поздним сходом снега процесс проходил чрезвычайно быстро — в течение 2–3 недель вся дельта освобождалась от снежного покрова.

Температурный режим

Для каждого года исследуемого периода была выполнена графическая визуализация климатических данных с мая по август, что помогло проанализировать флуктуации температуры как во время снеготаяния, так и в последующие две недели, когда растительность наиболее восприимчива к перепадам температуры. В климатических условиях, описанных далее, речь пойдёт о среднесуточной температуре воздуха на высоте 2 м.

В мае всегда преобладала отрицательная температура воздуха (19–31 день). В 2011–2014 гг. (Р) наблюдались значения выше 5 °С. В 2012 и 2013 гг. было всего 19 дней с температурой воздуха ниже нуля. Только в 2002, 2009 и 2015 гг. (С) среднесуточная температура всегда сохранялась ниже нуля, а в 2004 и 2017 гг. (П) было по 1 дню с температурой выше 0 °С (рис. 2, см. с. 209).

В июне 2011, 2012 и 2016 гг. все значения среднесуточной температуры воздуха были больше 0 °С. В 2016 г. (С) зафиксировано 19 дней с температурой 0–5 °С, в то время как в 2011 и 2012 гг. (Р) — только 13 и 11 соответственно, а во все остальные дни температура воздуха была выше 5 °С. В 2018 г. отмечено наибольшее количество дней со среднесуточной температурой воздуха выше 1 °С. В целом в 2000–2008 гг. было больше дней с отрицательной температурой воздуха, чем в последующие годы (см. рис. 2).

В июле температура воздуха в основном находилась в интервале 5–10 °С. В 2004 г. преобладали дни с температурой 0–5 °С, в 2001, 2011 и 2012 гг. большая часть дней была с температурой воздуха выше 10 °С. В 2016 г. отмечались значительные флуктуации температуры с резкими повышениями и понижениями. В 2001 г. зафиксировано максимальное количество дней (15) с температурой более 15 °С, в то время как в остальные годы за исследуемый период число таких дней не превышало 8. 2002 г. — единственный год с температурой воздуха ниже нуля (см. рис. 2).

Таблица 2. Классификация сроков снеготаяния на основе данных MODIS

Год	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Сход снега	Р	С	С	Р	П	С	С	С	С	С
Заморозки	+	+	–	+	–	–	+	+	+	+
Дата схода снега	17 мая	10 июня	2 июня	25 мая	18 июня	10 июня	2 июня	10 июня	10 июня	2 июня
$T_{cp15}, °C$	–1,08	2,96	1,94	1,11	4,19	5,14	4,34	8,23	6,94	3,24
Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Сход снега	Р	Р	Р	Р	Р	С	С	П	С	
Заморозки	+	+	+	+	+	–	–	–	–	
Дата схода снега	25 мая	17 мая	25 мая	17 мая	17 мая	10 июня	10 июня	18 июня	2 июня	
$T_{cp15}, °C$	0,84	0,31	4,21	–0,68	0,38	3,58	4,41	8,41	6,48	

Примечание: Р — 17–25 мая; С — 2–10 июня; П — 18 июня; T_{cp15} — среднесуточная температура воздуха в течение 15 сут после схода снега.



Рис. 2. Количество дней с определёнными диапазонами среднесуточной температуры на о. Самойловский за 2000–2018 гг.

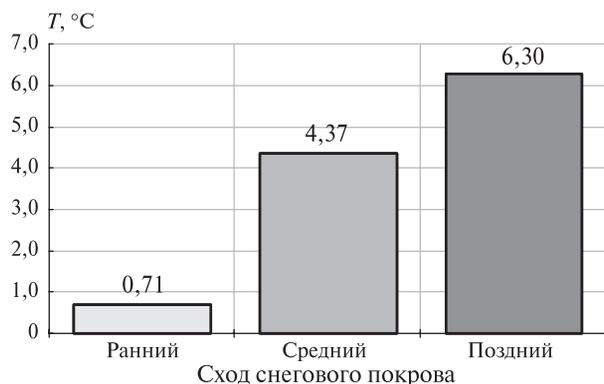


Рис. 3. Среднесуточная температура воздуха в течение 15 дней после раннего, среднего и позднего схода снега

Август обычно оставался тёплым, но с менее экстремально высокой температурой воздуха. В 2008 г. было 12 дней с температурой воздуха выше 15 °C (в остальные годы — не более 8 дней). В основном в августе преобладали дни с температурой воздуха 5–10 °C. До 2007 г. было больше холодных дней, чем в последующие годы (см. рис. 2).

Важную роль в развитии растительности играет температурный режим непосредственно после снеготаяния. Так, для сезонов с ранним сходом снега было характерно наличие нескольких дней с отрицательной среднесуточной температурой воздуха в июне и резким её ростом до 10 °C или выше. Годы с поздним снеготаянием в июне характеризовались стабильной отрицательной температурой без резких скачков. В годы со средним сходом снега период потепления был дольше, чем в годы с ранним, или температура воздуха сильно варьировала в пределах 0–7 °C.

Особое значение имеет наличие заморозков после схода снега. В табл. 2 указаны даты снеготаяния (на основе данных MODIS) и наличие заморозков после снеготаяния на основе данных температуры воздуха. В годы с поздним сходом снега не было заморозков, в годы с ранним сходом снега, наоборот, регулярно отмечались заморозки. Годы со средним снеготаянием были как с заморозками, так и без них.

На протяжении изучаемого периода наибольшие различия в сроках начала активной вегетации растительности составили более двух недель (2003 и 2011 гг., Р), что обусловлено заморозками после схода снегового покрова и считается очень длинным сроком для короткого северного лета. Чем раньше происходит снеготаяние, тем раньше растительность, не укрытая снежным покровом, подвергается воздействию низкой температуры воздуха, поскольку вынуждена развиваться вне температурного оптимума (Vitasse et al., 2016). Значительные колебания температурного режима вследствие заморозков приводят к замедлению развития и более низкой продуктивности зелёной фитомассы (Chapin, Bloom, 1976).

Особенность арктических растений состоит в том, что они способны адаптироваться к экстремальным условиям внешней среды: низкой температуре, изменчивости высоты снегового покрова, различным условиям увлажнения и освещения. Если у растений умеренных широт процесс фотосинтеза протекает наиболее продуктивно при температуре 25 °C, то оптимальные условия для арктических видов — 15 °C. Жизненно важные процессы могут протекать даже при температуре 0 °C (Chapin, 1983). Единственное время, когда растения в наибольшей степени подвержены воздействию суровых условий окружающей среды, — это период после снеготаяния длительностью в несколько дней (Klein et al., 2018). Е. М. Короткова и В. В. Зуев (2021) на основе многолетних данных выяснили, что за 1997–2015 гг. продуктивность растительных сообществ тундры с увеличением температуры воздуха возросла, что свидетельствует о повышении чувствительности растительности к потеплению.

Среднесуточная температура воздуха в течение 15 дней после снеготаяния варьировала от отрицательной до +8 °C. В годы с ранним сходом снега средняя суточная температура в течение 15 дней не превышает 1 °C, в годы с поздним составляет 6,3 °C (рис. 3).

Межгодовая динамика растительности

В годы с ранним сходом снега наблюдались значительные различия по срокам начала вегетации. В сезоны с многократными перепадами температуры и большой амплитудой значений развитие растительного покрова могло начаться спустя 3,5 недели после схода снега.

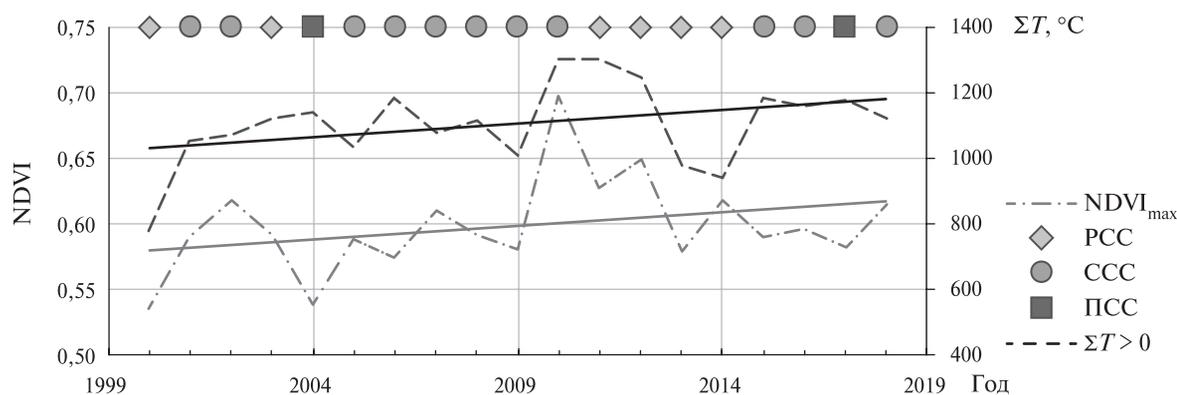


Рис. 4. Межгодовые изменения CAT и максимального значения NDVI на едомной возвышенности; PCC — ранний сход снега, CCC — средний, ПСС — поздний

В годы с менее выраженными перепадами температуры подобной задержки не наблюдалось и накопление биомассы начиналось спустя две недели после снеготаяния. В годы с ранним сходом снега амплитуда значений NDVI в целом больше, чем в годы со средним и поздним сходом снега: 0,187 и 0,156 для конца июня и 0,118 и 0,053 для конца июля соответственно.

Для каждого года была рассчитана сумма активных температур (CAT) с порогом в 0 °C, которая варьировала от 542 до 1191 °C. Вопреки ожиданиям, для сезонов с ранним снеготаянием были характерны как крайне низкие значения CAT, так и высокие (от 542 до 998 °C). Годам с поздним сходом снега соответствовали пониженные значения CAT (553 °C в 2004 г. и 727 °C в 2017 г.). В годы со средним сходом снега эти показатели варьировали от 698 до 1191 °C.

Анализ сопряжения многолетней динамики CAT и максимального значения NDVI (рис. 4) показал наличие достаточно высокой корреляционной связи между ними ($r = 0,582$). Кроме того, зарегистрировано, что в годы с низкими значениями CAT (2004, 2013) закладывается негативное воздействие на прирост зелёной фитомассы и понижение значений NDVI в последующий год. Это можно объяснить снижением семенной продуктивности в неблагоприятные годы, а также неподходящими условиями для заложения почек вегетативного размножения (Гусев, 2021; Касаткина и др., 2021). Кроме того, отмечен тренд на повышение значений NDVI и суммы активных температур.

Сезонная динамика растительности

Для анализа сезонной динамики растительности были использованы снимки MODIS (геоботаническая площадка на едомной возвышенности) и снимки Landsat-8 и Sentinel-2A.

Многолетние данные, полученные при изучении снимков MODIS, позволили проанализировать сезонную динамику растительности за 2000–2018 гг. (рис. 5, см. с. 212). Для растительных сообществ едомной возвышенности в годы с ранним и средним снеготаянием была зарегистрирована сходная динамика: плавное нарастание биомассы до начала июля, максимальные значения NDVI без выраженных пиков до середины августа, после чего наблюдалось снижение этого показателя. В годы с поздним снеготаянием отмечен сдвиг в нарастании биомассы примерно на две недели и формирование максимальных значений NDVI в 1–2-й декадах августа.

В 2018 г. в срединной части дельты р. Лены снеготаяние началось в самом начале июня, что позволяет отнести этот год к категории со средним временем схода снегового покрова. По материалам снимков Landsat-8 установлено, что в первую очередь снег сходил с возвышенных хребтов и участков, прилегающих к основным рукавам дельты. Затем снеготаяние продолжилось на едомной возвышенности, в полигональной тундре и небольших долинах

водотоков. На участках с отрицательными формами рельефа снег таял более медленно. Озёра оставались покрытыми льдом и снегом гораздо дольше, чем поверхность суши. На изученном участке процесс снеготаяния на о. Курунгнах начинается раньше, чем на о. Самойловский.

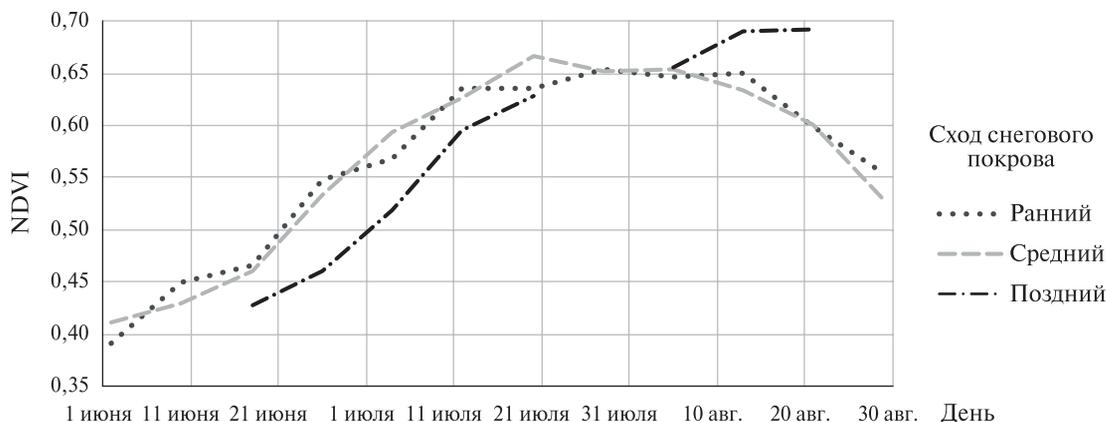


Рис. 5. Усреднённые значения NDVI для лет с ранним, средним и поздним снеготаянием

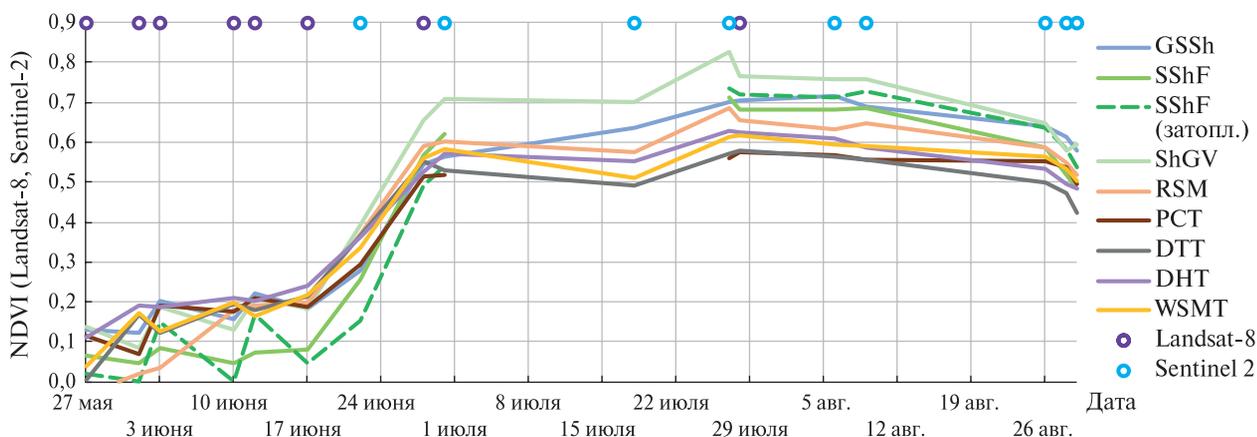


Рис. 6. Изменение индекса NDVI на участках с различными типами растительности в течение вегетативного сезона 2018 г. (типы растительности расшифрованы в табл. 1)

Для каждого типа растительности значения индекса NDVI были усреднены. Для пойменных осоково-кустарничковых сообществ на графике представлены две отдельные кривые, поскольку в течение нескольких лет территория одной из площадок затапливалась в период половодья (включая 2018 г.), а другой — не подвергалась затоплению (рис. 6).

По материалам снимков 2018 г., снег на территории исследования растаял практически полностью к 10 июня, за исключением отрицательных форм рельефа. Вплоть до 17 июня у всех типов растительности наблюдались низкие значения NDVI (<0,3). В этот период индекс значительно варьировал в связи с активным снеготаянием — наличие воды на поверхности земли негативно сказывалось на показателях индекса. На пойменных участках наблюдались минимальные значения, так как снег остаётся здесь на протяжении более длительного периода времени по сравнению с о. Курунгнах. Несмотря на это, на незатапливаемой площадке наблюдались стабильно низкие значения индекса, на затапливаемой — постоянно изменялись со значительной амплитудой из-за периодического подтопления.

Начиная со второй половины июня в течение недели наблюдалось резкое увеличение значений NDVI, характеризующее экспоненциальный рост растительности во всех типах сообществ, и последующий выход значений индекса на плато. Минимальными значениями индекса отличались полигональные тундровые комплексы с осоковой и моховой растительно-

стью (около 0,55), сухая кочкарная тундра и сухотравная тундра (около 0,6), которые в дальнейшем практически не набирали зелёной массы после возрастания индекса в конце июня до конца вегетации. Остальные растительные сообщества продолжали накопление фитомассы: у прибрежной растительности с преобладанием осоково-моховых сообществ в течение июля значения NDVI выросли с 0,59 до 0,72, у комплексов сухотравной тундры с влажными осоковыми сообществами с кустарничками — с 0,55 до 0,70. На территории незатопленной части поймы значения индекса выросли с 0,56 до 0,71, на затопленной части — с 0,49 до 0,74. Для растительных сообществ низкокустарничково-травяных долин отмечали максимальное накопление зелёной фитомассы: значения NDVI выросли с 0,66 до 0,83.

В течение августа индекс растительности плавно понижался на всех исследуемых участках, кроме сообществ на полигональных тундровых комплексах с осоковой и моховой растительностью и влажной осоково-моховой тундры, где значения NDVI оставались неизменными и снизились только в самом конце месяца.

Заключение

В течение изученного периода сход снегового покрова занимал 2–3 недели в годы с поздним снеготаянием и освобождением участка исследований от снега к 18 июня до одного месяца в годы с ранним снеготаянием и освобождением участка исследований от снега к 17–25 мая. Время снеготаяния полностью зависело от климатических условий, и каких-либо закономерностей в межгодовом изменении времени схода снега выявлено не было.

Для арктических растений особенно важную роль температурный режим играет непосредственно после снеготаяния. За исследованный период средняя суточная температура воздуха в течение 15 дней после схода снегового покрова в годы с ранним снеготаянием составила 0,71 °С (ежегодно отмечались заморозки), со средним — 4,37 °С, с поздним — 6,3 °С (заморозки отсутствовали).

Наиболее сильно влиянию метеорологических условий после снеготаяния подвергалась растительность в годы с ранним снеготаянием: были отмечены задержка вегетации при больших амплитудах колебания среднесуточной температуры воздуха и увеличенная межгодовая амплитуда индекса NDVI. Однако рассмотренные усреднённые данные не выявили значительных отклонений в сезонном развитии NDVI в годы с ранним и средним сходом снегового покрова, свидетельствуя об отсутствии негативных последствий для каждого года с ранним сходом снега.

В годы с ранним и поздним снеготаянием отмечались отрицательные пики суммы активных температур, в результате чего в последующий год наблюдались заниженные значения NDVI как следствие неблагоприятных условий для развития растительности.

Экспоненциальный рост растительности во всех типах сообществ после снеготаяния продолжался в течение недели, сопровождаемый резким увеличением значений NDVI и выходом значений индекса на плато. К концу лета наблюдался постепенный спад значений NDVI. Минимальные значения были отмечены у полигональных тундровых комплексов с осоковой и моховой растительностью, сухой кочкарной тундры и сухотравной тундры. Максимальные значения фитомассы зафиксированы у низкокустарничково-травяных сообществ долин.

Автор выражает большую благодарность Б. Хайм и Ю. Шевцовой за предоставленную возможность исследования данного района и материалы, за советы и рекомендации на протяжении работы над исходным проектом, а также глубоко признательна И. А. Лавриненко за ценные советы при повторном анализе данных и финальной редакции статьи.

Литература

1. Васильчук Ю. К. Едома. Часть 1. История геокриологического изучения в XIX и XX веках // Арктика и Антарктика. 2022. № 4. С. 54–114. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.4.39339.

2. Гусев А. П. Изменения NDVI в природных и антропогенных ландшафтах Белорусского Полесья в 2000–2020 гг. // Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов: материалы Всерос. научно-практич. конф. 2021. С. 218–223. DOI: 10.26170/KFG-2021-31.
3. Касаткина Н. И., Нелюбина Ж. С., Фатыхов И. Ш. Влияние погодных условий и способов посева на семенную продуктивность клевера лугового в среднем Предуралье // Изв. Национальной акад. наук Беларуси. Сер. аграрных наук. 2021. Т. 59. № 2. С. 178–185. DOI: 10.29235/1817-7204-2021-59-2-178-185.
4. Короткова Е. М., Зуев В. В. Отклик растительного покрова Западно-Сибирской равнины на климатические изменения в 1982–2015 гг. // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 50–59. DOI: 10.31857/S0205961421060051.
5. Allen M. R., Dube O. P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J., Mahowald N., Mulugetta Y., Perez R., Wairiu M., Zickfeld K. IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Chapter 1: Framing and Context. 2018. P. 49–82.
6. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K. et al. Circumpolar Arctic Tundra Vegetation Change Is Linked to Sea Ice Decline // Earth Interactions. 2010. Iss. 8. V. 14. P. 1–20. DOI: 10.1175/2010EI1315.1.
7. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K. et al. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environmental Research Letters. 2017. V. 12. No. 5. Article 055003. DOI: 10.1088/1748-9326/aa6b0b.
8. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K. et al. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011) // Biogeosciences. 2013. Iss. 3. V. 10. P. 2105–2128. DOI: 10.5194/bg-10-2105-2013.
9. Boike J., Cable W. L., Bolshiyakov D. Yu. et al. Continuous measurements in soil and air at the permafrost long-term observatory at Samoylov Station (2002 et seq) / Alfred Wegener Inst. — Research Unit Potsdam. PANGAEA, 2022. DOI: 10.1594/PANGAEA.947032.
10. Chapin F. S. Direct and Indirect Effects of Temperature on Arctic Plants // Polar Biology. 1983. V. 2. P. 47–52. DOI: 10.1007/BF00258285.
11. Chapin F. S., Bloom A. J. Phosphate absorption: adaptation of tundra graminoids to a low temperature, low phosphorus environment // Oikos. 1976. V. 27. No. 1. P. 111–121. DOI: 10.2307/3543439.
12. Ding Q., Schweiger A., L'Heureux M. et al. of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice // Nature Climate Change. 2017. Iss. 4. V. 7. P. 289–295. DOI: 10.1038/nclimate3241.
13. Gamon J. A., Huemmrich K. F., Stone R. S., Tweedie C. E. Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 129. P. 144–153. DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.030.
14. Klein G., Rebetez M., Rixen C., Vitasse Y. Unchanged risk of frost exposure for subalpine and alpine plants after snowmelt in Switzerland despite climate warming // Intern. J. Biometeorology. 2018. Iss. 9. V. 62. P. 1755–1762. DOI: 10.1007/s00484-018-1578-3.
15. Loranty M. M., Goetz S. J. Shrub expansion and climate feedbacks in Arctic tundra // Environmental Research Letters. 2012. V. 7. No. 1. Article 015503. DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/011005.
16. May J. L., Healey N. C., Ahrends H. E. et al. Short-Term Impacts of the Air Temperature on Greening and Senescence in Alaskan Arctic Plant Tundra Habitats // Remote Sensing. 2017. V. 9. No. 12. DOI: 10.3390/rs9121338.
17. Mod H., Luoto M. Arctic shrubification mediates the impacts of warming climate on changes to tundra vegetation // Environmental Research Letters. 2016. Iss. 12. V. 11. Article 124028. DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/124028.
18. Monthly Global Climate Report for Annual 2022 / NOAA National Centers for Environmental Information. 2022. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>.
19. Morgenstern A., Ulrich M., Gunther F. et al. Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study // Geomorphology. 2013. V. 201. P. 363–379. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.07.011.
20. Pearson R. G., Phillips S. J., Loranty M. M. et al. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change // Nature Climate Change. 2013. Iss. 7. V. 3. P. 673–677. DOI: 10.1038/NCLIMATE1858.
21. Perovich D. K. The Changing Arctic Sea Ice Cover // Oceanography. 2011. Iss. 3. V. 24. P. 162–173. DOI: 10.5670/oceanog.2011.68.
22. Phoenix G. K., Bjerke J. W. Arctic browning: extreme events and trends reversing arctic greening // Global Change Biology. 2016. Iss. 9. V. 22. P. 960–2962. DOI: 10.1111/gcb.13261.
23. Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M. N. Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta // Quaternary Intern. 2002. Iss. 1. V. 89. P. 119–134. DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00084-2.
24. Semmens K. A., Ramage J., Bartsch A., Liston G. E. Early snowmelt events: detection, distribution, and significance in a major sub-arctic watershed // Environmental Research Letters. 2013. V. 8. 11 p. Article 014020. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014020.

25. Vankoughnett M. R., Grogan P. Plant production and nitrogen accumulation above- and belowground in low and tall birch tundra communities: the influence of snow and litter // *Plant Soil*. 2016. V. 408. P. 195–210. DOI: 10.1007/s11104-016-2921-2.
26. Vitasse Y., Rebetez M., Filippa G. et al. “Hearing” alpine plants growing after snowmelt: ultrasonic snow sensors provide long-term series of alpine plant phenology // *Intern. J. Biometeorology*. 2016. Iss. 2. V. 6. P. 349–361. DOI: 10.1007/s00484-016-1216-x.
27. Wipf S. Phenology, growth, and fecundity of eight subarctic tundra species in response to snowmelt manipulations // *Plant Ecology*. 2010. Iss. 1. V. 207. P. 53–66. DOI: 10.1007/s11258-009-9653-9.
28. Zona D., Lafleur P. M., Hufkens K. et al. Earlier snowmelt may lead to late season declines in plant productivity and carbon sequestration in Arctic tundra ecosystems // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. Article 3986. DOI: 10.1038/s41598-022-07561-1.

Effects of snowmelt on seasonal and interannual vegetation dynamics in the Lena Delta

K. I. Simonova

Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg 197022, Russia
E-mail: KSimonova@binran.ru

The article is dedicated to investigation of vegetation dynamics depending on snowmelt timing and accompanying air temperatures on Samoylov and Kurungnakh islands in Lena delta. Meteorological data, multispectral images of MODIS, Landsat-8 and Sentinel-2 have been processed to analyze seasonal and interannual (2000–2018) development of local vegetation cover. Plant community feedback to environmental conditions in the beginning of vegetation season has been studied based on snowmelt timing and daily mean air temperatures. Besides, seasonal vegetation types` dynamics have been studied. As a result of current study typical snowmelt timing and air temperature conditions have been revealed. Average air temperatures within 15 days after snowmelt have been identified for years with early, average and late snowmelt. Dependency of NDVI and sum of temperatures above 0 °C has been brought to light. During the years with least amount of warm days the environmental conditions were less favorable for vegetation development in the following year.

Keywords: Arctic, vegetation dynamics, remote sensing, NDVI, snowmelt

Accepted: 10.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-205-216

References

1. Vasilchuk Yu. K., Yedoma. Part I. Annals of geocryological research in the XIX–XX centuries, *Arctica and Antarctica*, 2022, No. 4, pp. 54–114 (in Russian), DOI: 10.7256/2453-8922.2022.4.39339
2. Gusev A. P., Changes NDVI in natural and anthropogenic landscapes of the Belorussian Polesia in 2000–2020, *Klimaticheskie izmeneniya i sezonnaya dinamika landshaftov* (Climatic changes and seasonal dynamics of landscapes), Proc. All-Russian Scientific-Practical Conf., 2021, pp. 218–223 (in Russian), DOI: 10.26170/KFG-2021-31.
3. Kasatkina N. I., Nelyubina Z. S., Fatykhov I. Sh., Impact of weather conditions and sowing method on seed performance of meadow clover in the middle Urals, *Proc. National Academy of Sciences of Belarus, Agrarian Ser.*, 2021, Vol. 59, No. 2, pp. 178–185 (in Russian), DOI: 10.29235/1817-7204-2021-59-2-178-185.
4. Korotkova E. M., Zuev V. V., The Response of the West Siberian Plant Vegetation Cover to Climate Change in 1982–2015, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, No. 6, pp. 50–59 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961421060051.
5. Allen M. R., Dube O. P., Solecki W., Aragón-Durand F., Cramer W., Humphreys S., Kainuma M., Kala J., Mahowald N., Mulugetta Y., Perez R., Wairiu M., Zickfeld K., *IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Chapter 1: Framing and Context*, 2018, pp. 49–82.

6. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K. et al., Circumpolar Arctic Tundra Vegetation Change Is Linked to Sea Ice Decline, *Earth Interactions*, 2010, Issue 8, Vol. 14, pp. 1–20, DOI: 10.1175/2010EI315.1.
7. Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K. et al., Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables, *Environmental Research Letters*, 2017, Vol. 12, No. 5, Article 055003, DOI: 10.1088/1748-9326/aa6b0b.
8. Boike J., Kattenstroth B., Abramova K. et al., Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011), *Biogeosciences*, 2013, Issue 3, Vol. 10, pp. 2105–2128, DOI: 10.5194/bg-10-2105-2013.
9. Boike J., Cable W. L., Bolshiyakov D. Yu. et al., *Continuous measurements in soil and air at the permafrost long-term observatory at Samoylov Station (2002 et seq)*, Alfred Wegener Inst. — Research Unit Potsdam, PANGAEA, 2022, DOI: 10.1594/PANGAEA.947032.
10. Chapin F. S., Direct and Indirect Effects of Temperature on Arctic Plants, *Polar Biology*, 1983, Vol. 2, pp. 47–52, DOI: 10.1007/BF00258285.
11. Chapin F. S., Bloom A. J., Phosphate absorption: adaptation of tundra graminoids to a low temperature, low phosphorus environment, *Oikos*, 1976, Vol. 27, No. 1, pp. 111–121, DOI: 10.2307/3543439.
12. Ding Q., Schweiger A., L'Heureux M. et al., Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice, *Nature Climate Change*, 2017, Issue 4, Vol. 7, pp. 289–295, DOI: 10.1038/nclimate3241.
13. Gamon J. A., Huemmrich K. F., Stone R. S., Tweedie C. E., Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 129, pp. 144–153, DOI: 10.1016/j.rse.2012.10.030.
14. Klein G., Rebetz M., Rixen C., Vitasse Y., Unchanged risk of frost exposure for subalpine and alpine plants after snowmelt in Switzerland despite climate warming, *Intern. J. Biometeorology*, 2018, Issue 9, Vol. 62, pp. 1755–1762, DOI: 10.1007/s00484-018-1578-3.
15. Loranty M. M., Goetz S. J., Shrub expansion and climate feedbacks in Arctic tundra, *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 1, Article 015503, DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/011005.
16. May J. L., Healey N. C., Ahrends H. E. et al., Short-Term Impacts of the Air Temperature on Greening and Senescence in Alaskan Arctic Plant Tundra Habitats, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, No. 12, DOI: 10.3390/rs9121338.
17. Mod H., Luoto M., Arctic shrubification mediates the impacts of warming climate on changes to tundra vegetation, *Environmental Research Letters*, 2016, Issue 12, Vol. 11, Article 124028, DOI: 10.1088/1748-9326/11/12/124028.
18. *Monthly Global Climate Report for Annual 2022*, NOAA National Centers for Environmental Information, 2022, <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>.
19. Morgenstern A., Ulrich M., Gunther F. et al., Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study, *Geomorphology*, 2013, Vol. 201, pp. 363–379, DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.07.011.
20. Pearson R. G., Phillips S. J., Loranty M. M. et al., Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change, *Nature Climate Change*, 2013, Issue 7, Vol. 3, pp. 673–677, DOI: 10.1038/NCLIMATE1858.
21. Perovich D. K., The Changing Arctic Sea Ice Cover, *Oceanography*, 2011, Issue 3, Vol. 24, pp. 162–173, DOI: 10.5670/oceanog.2011.68.
22. Phoenix G. K., Bjerke J. W., Arctic browning: extreme events and trends reversing arctic greening, *Global Change Biology*, 2016, Issue 9, Vol. 22, pp. 960–2962, DOI: 10.1111/gcb.13261.
23. Schwamborn G., Rachold V., Grigoriev M. N., Late Quaternary sedimentation history of the Lena Delta, *Quaternary Intern.*, 2002, Issue 1, Vol. 89, pp. 119–134, DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00084-2.
24. Semmens K. A., Ramage J., Bartsch A., Liston G. E., Early snowmelt events: detection, distribution, and significance in a major sub-arctic watershed, *Environmental Research Letters*, 2013, Vol. 8, 11 p., Article 014020, DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014020.
25. Vankoughnett M. R., Grogan P., Plant production and nitrogen accumulation above- and belowground in low and tall birch tundra communities: the influence of snow and litter, *Plant Soil*, 2016, Vol. 408, pp. 195–210, DOI: 10.1007/s11104-016-2921-2.
26. Vitasse Y., Rebetz M., Filippa G. et al., “Hearing” alpine plants growing after snowmelt: ultrasonic snow sensors provide long-term series of alpine plant phenology, *Intern. J. Biometeorology*, 2016, Issue 2, Vol. 6, pp. 349–361, DOI: 10.1007/s00484-016-1216-x.
27. Wipf S., Phenology, growth, and fecundity of eight subarctic tundra species in response to snowmelt manipulations, *Plant Ecology*, 2010, Issue 1, Vol. 207, pp. 53–66, DOI: 10.1007/s11258-009-9653-9.
28. Zona D., Lafleur P. M., Hufkens K. et al., Earlier snowmelt may lead to late season declines in plant productivity and carbon sequestration in Arctic tundra ecosystems, *Scientific Reports*, 2022, Vol. 12, Article 3986, DOI: 10.1038/s41598-022-07561-1.