

СДВИГ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЗОН В ЯКУТИИ И РЕАКЦИЯ НАЗЕМНОГО ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА

Захаров М.И., Тананаев Н.И.,

*Северо-Восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова, г. Якутск, Россия
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия*

Аннотация. Сдвиги в климатической системе повышают вероятность широкомасштабных и необратимых трансформаций геосистем, включая изменения в наземном ландшафтном покрове. Подчёркивая необходимость прогнозирования будущего распределения ландшафтной структуры. В этой статье мы показываем, используя климатических модели ретроспективного анализа (GHCN-CAMS и CRU TS 4.05) на период 1960-2020 гг. сдвиги климатических зон по классификации Кеппена-Гейгера и реакцию ландшафтного покрова по данным MODIS (MCD12Q1) версии 6.1 на период 2001-2022 гг и по набору данных изменения ландшафтного покрова по снимкам Landsat Университета Мэриленд на период 2000-2020 гг севернее 70° широты. Нами установлена низкая чувствительность климатических зон на изменение наземного ландшафтного покрова. Отчётливо выражен сдвиг границ ландшафтов для северо-западной Якутии, где существенно сократилась зона очень холодных зим (Dsc), при этом сопоставимые изменения происходят и на равнинах северо-востока Якутии. Изменения в тундровой климатической зоне почти не привели к сдвигам в наземном ландшафтном покрове.

Ключевые слова. *Изменение наземного ландшафтного покрова, климатические зоны Кеппена-Гейгера, изменение климата, Якутия*

SHIFT OF CLIMATE ZONES IN YAKUTIA AND LAND COVER CHANGE REACTION

Zakharov M.I., Tananaev N.I.,

*M.K.Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia*

Abstract. Shifts in the climate system increase the potential for widespread and irreversible impacts to geosystems, including shifts in land cover. By emphasizing the need to predict the future distribution of landscape structure. In this paper, we present, through retrospective climate models (GHCN-CAMS and CRU TS 4.05) for the period 1960-2020, shifts in climate zones using the Keppen-Geiger classification and land cover response from MODIS (MCD12Q1) version 6.1 data for the period 2001-2022 and a dataset of land cover change from Landsat imagery provided by the University of Maryland for the period 2000-2020 from north of 70° latitude. We have established a low sensitivity of climatic zones to land cover change. The shift of landscape boundaries is clearly expressed for Western Yakutia, where the zone of very cold winters (dsc) has significantly decreased, but comparable changes occur in the plains of Northeast Yakutia. Changes in the tundra climatic zone almost did not lead to shifts in the land cover.

Keywords. *land cover change, Köppen-Geiger climatic zones, climate change, Yakutia*

Введение. Проблема воздействия изменения климата на природные системы находится в центре внимания мировой науки, поэтому по проблеме географических сдвигов биомов и их сценарный прогноз достаточно хорошо представлен на глобальном уровне и в регионах мира. Сценарии изменения климата использовались в оценках МГЭИК, начиная с Первого оценочного доклада [1]. К четвертому оценочному докладу МГЭИК 2007 года немецкими

исследователями были разработаны первые сценарные прогнозы изменений наземных экосистем к 2100 г. по сравнению с 2000 г. по моделям биомов LPJ-DGVM [2], по двум климатическим моделям HadCM3 A2 и ECHAM5 B1. Одной из значимых работ стали разработки американских учёных по глобальным сценарным моделям и оценки динамики биомов по сводным климатическим моделям третьего поколения (CMIP3) [3]. К последнему шестому оценочному докладу МГЭИК 2022 года появились множество региональных исследований географических сдвигов биомов по Арктике с использованием сценарии Репрезентативные пути концентрации углерода (RCP), принятых в Парижской конференции по изменению климата 2015 года. В 2021 году появились результаты климатических моделей, представленных шестым поколением проекта взаимного сравнения связанных моделей (CMIP6), которые отражают современное состояние научных знаний об изменении климата и позволяют подбирать наиболее достоверные ансамбли моделей для отдельно взятых регионов и территорий [4].

Классификация Кеппена–Гейгера [5, 6] часто используется для взаимосвязи разных климатических условий с типами биомов. Это одна из наиболее широко распространённых систем классификации климата на основе среднемесячных значений приземной температуры воздуха и количества осадков. Система Кеппена-Гейгера делит климат на пять основных классов и 30 подтипов. Изменения в региональном распределении климата могут повлиять на наличие и распределение климатически подходящих территорий для растительности. Целью данного исследования является определение реакции ландшафтного покрова через устойчивую смену класса в Якутии на сдвиги климатических зон по историческому реанализу температуры и осадков. В частности, мы исследовали (1) временные сдвиги зон Кеппена-Гейгера по четырём 30-летним периодам (1961-1990; 1971-2000; 1981-2010; 1991-2020 гг.); (2) реакция ландшафтного покрова на изменения по данным наземного ландшафтного покрова низкого разрешения (500м) на территории всей Якутии и (3) увеличение площади лесного покрова в Северной Якутии (севернее 70° широты). Физико-географические условия и размеры Якутии делают её климат сложным и разнообразным, территория региона расположена в трёх ландшафтных странах равнинной Средней Сибири, горных Северо-Востока Сибири и Южной Сибири [7]. Исследование реакции ландшафтного покрова и соответствующих типов климата может лучше оценить уникальность изменения климата в данном масштабе, а также может помочь нам понять влияние изменения климата на биомы.

Методы и материалы. Для создания карт климатических норм использованы среднемесячные данные приземной температуры и количества осадков. Для приземной температуры использован реанализ GHCH-CAMS, который с высокой точностью воспроизводит изменение среднемесячной температуры воздуха между климатическими периодами [8]. Для карт осадков примерно такими же характеристиками обладает модель CRU TS v.4.05. Климатические зоны Кеппена-Гейгера построены с использованием функций cliKoppenGrid библиотеки ‘**MacroBiome**’ в RStudio [9]. Всего было построено четыре карты климатических зон по 30-ти летним периодам (1961-1990; 1971-2000; 1981-2010; 1991-2020 гг.) (Рис. 1).

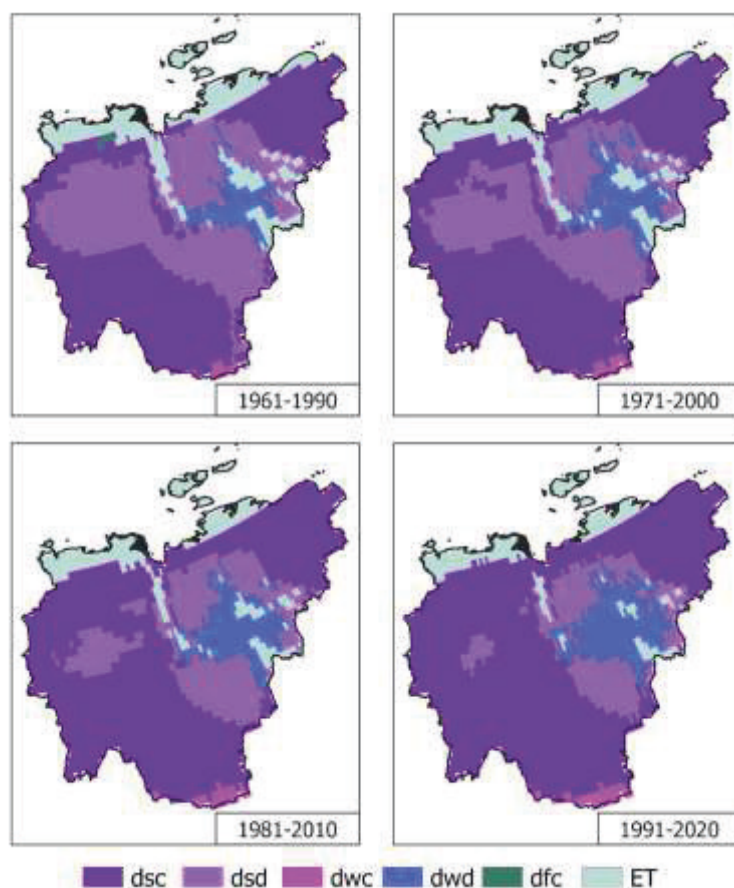


Рис. 1. Динамика климатических зон Кеппена-Гейгера на территории Якутии на период с 1961-2020. Условные обозначения. Dsc - холодный континентальный с сухим холодным летом, Dsd - холодный континентальный с сухим очень холодным летом, Dwc - холодный континентальный с сухой зимой и холодным летом, Dwd - холодный континентальный с сухой зимой и очень холодным летом, Dfc -- холодный континентальный с сухой холодной зимой и сухим холодным лето, ET - климат тундры

Динамика ландшафтного покрова изучения по готовым наборам данных классификации MODIS (MCD12Q1) версии 6.1 на период 2001-2022 гг по классам наземного покрова Международной геосферно-биосферной программа (IGBP) с пространственным разрешением 500м доступных в облачной платформе Google Earth Engine [10]. Данные изменения наземного покрова рассчитаны с помощью плагина Semi-Automatic Classification в QGIS, где нами отсеяны значения ячеек без изменений и ячейки, связанные с флуктуациями ландшафтного покрова в результате лесных пожаров или ошибки классификации. Вторым набором данных, использованным для анализа реакции ландшафтов на сдвиги климатических зон, это классификации наземного покрова Университета Мэриленд по наиболее качественным архивным снимкам Landsat [11]. Мы использовали тайловые слои распространения лесов на 2000 и 2020 года, разница между этими датами даёт чистый переход нелесного покрова в лесной в высоком пространственном разрешении (30м). Мы выбрали тайлы выше 70° широты, так как при охвате всей территории Якутии, в лесной полосе допускается большая ошибка, связанная с гарями, возникшие до 2000 году и классифицированные как нелесные, к 2020 году восстановившие свой покров, за счёт чего площадь новых лесов резко увеличивался.

Для анализа реакции ландшафтного покрова использована зональная статистика по регулярной сетке, построенной по размерам ячеек климатических данных (0,5°). По

полученным полигонам рассчитаны количества пикселей в которых поменялся класс наземного покрова, что является одним из показателей динамики ландшафтов.

Результаты и их обсуждение. По классификации Кеппена-Гейгера территория Якутия находится в зоне холодного континентального климата с 5 подзонами и в зоне климата тундры. Согласно карте климатических зон мира, на территории Якутии выделяется 6 подзон холодного континентального климата [5]. Различия связаны с пространственным разрешением данных использованных для картографирования и использованием различных моделей реанализа. В нашем случае, использованы данные имеющие наибольшую пространственную корреляцию с данными метеорологических наблюдений.

Сдвиги климатических зон по разнице моделирований 1961-1990 и 1991-2020 существенны для Северо-Западной Якутии с лиственничными редколесьями. Зона климата тундры уменьшается за счёт перехода к холодному континентальному с сухой зимой и холодным летом. К территориям со стабильным климатом отнесены: колымский бассейн, Лено-Амгинское междуречье, западная и южная Якутия (рис 2. а).

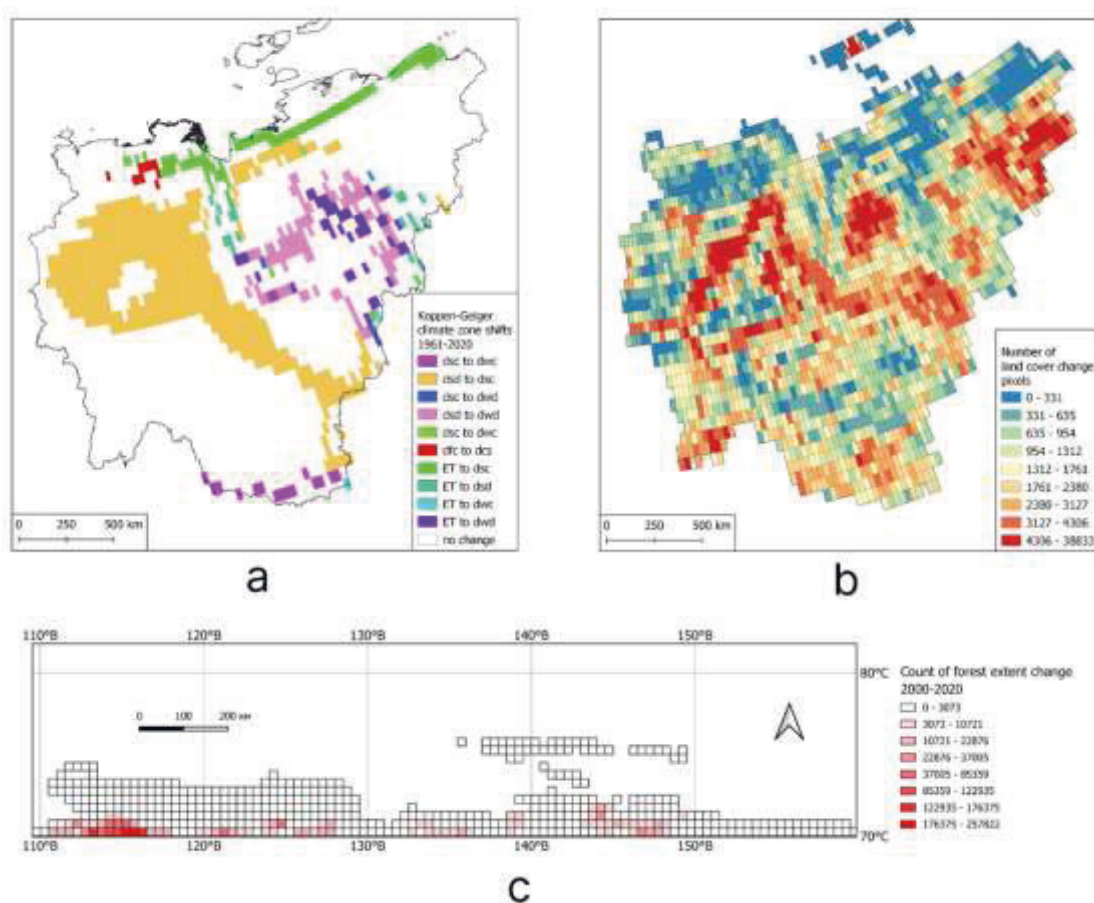


Рис. 2. Изменение климатических зон и реакция ландшафтного покрова: а) сдвиги климатических зон Кеппена-Гейгера 1961-2020; б) зональная статистика по количеству пикселей с переходом классов ландшафтного покрова под данным IGBP; в) зональная статистика по количеству пикселей с появлением нового лесного покрова на севере Якутии.

Наибольшие изменения по площади относятся к переходу холодного континентального климата с сухим очень холодным летом к климату с сухим холодным летом, то есть за счёт повышения среднемесячных температур июля. По количеству пикселей с измененным ландшафтным покровом выявлены линии наступления лесов на северо-западе Якутии (рис 2. б). Увеличение площади лесов выявлены в Янском плоскогорье и в Колымской низменности

в местах где не наблюдается изменение климатической зоны, а также почти не фиксируется реакция тундровых ландшафтов на сдвиг климатической зоны.

Зональная статистика появления нового лесного покрова по данным наземного покрова Landsat, показывает значительно более интенсивное зарастание на северо-западе Якутии (рис 2. с). Лесной покров почти не появился в Колымской низменности и мало продвигается в условиях горного ландшафта (кряж Чекановского).

Исследование климатообусловленной динамики ландшафтного покрова по данным дистанционного зондирования довольно затруднительно. В первую очередь, это связано с необходимостью отсеивания пикселей, где изменение связано с лесным пожаром или облачностью снимка. Проблема чувствительности климатических и биомных классификаций, которые могут быть построены по биоклиматическим переменным из исторического реанализа или сценарных прогнозов играет важную роль в понимании современного глобального потепления. Классификация Кеппена-Гейгера при всей популярности его использования слабо отражает изменения климатических условий развития геосистем, что затрудняет её использование в оценке климатической устойчивости и ожидаемых перемен в ландшафтной структуре.

При этом сдвиг климатической зоны не означает быструю смену ландшафтного покрова, но при этом могут создать для них менее благоприятные или наоборот благоприятные условия для увеличения биомассы геосистем, в первую очередь, за счёт изменения физиологического состояния растительного покрова.

Выводы. В этом исследовании мы создали серию карт климатических зон Якутии с разрешением $0,1^\circ$ с 1961 по 2020 год, используя классификацию Кеппен-Гейгера, что предоставила непрерывные мелкомасштабные данные тридцатилетних климатических режимов. Если рассматривать по регионам Якутии, наибольшими изменениями затронута Западная Якутия, где практически исчезла подзона холодного континентального климата с сухим и очень холодным летом (Dsd), замещённая подзоной холодного континентального с сухим холодным летом (Dsc). Смена подзон климата связана в большей степени повышением температур воздуха и меньшей степени изменением режима осадков. Изменение зон Кеппена-Гейгера предполагает вероятность появления условий для трансформации геосистем, например, продвижение северной границы лесного покрова, что по данным ландшафтного покрова наиболее интенсивны для северо-востока Якутии. Однако, чувствительность ландшафтного покрова к модели климатических зон остаётся неопределённой.

Литература

1. Изменение климата, 2007 г.: обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Под ред. З.К. Пачури, А. Райзингер. Женева: МГЭИК, 2008. 104 с
2. Prentice, I. C., Cramer, W., Harrison, S. P., Leemans, R., Monserud, R. A., & Solomon, A. M. (1992). Special Paper: A Global Biome Model Based on Plant Physiology and Dominance, Soil Properties and Climate. *Journal of Biogeography*, 19(2), 117.
3. Sitch, S., B. Smith, I.C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J.O. Kaplan, S. Levis, W. Lucht, M.T. Sykes, K. Thonicke and S. Venevsky, 2003: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biol.*, 9, 161-185.
4. Gonzalez, P., Neilson, R. P., Lenihan, J. M., & Drapek, R. J. (2010). Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), 755–768.

5. Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T., Vergopolan, N., Berg, A., Wood, E.F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 180214 (2018).
6. Feng, Y. and Du, S.: Climate changes and landscape responses of China during the past 40 years (1979–2018) under Köppen-Geiger climate classification, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-3-2020, 731–737
7. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Федоров А.Н., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Васильев Н.Ф., Макаров В.С. [и др].; гл. ред. М.Н. Железняк – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 л.
8. Tananaev N.I. Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia // *Polar Science*. 2024, 101066. 13 p.
9. Szelepcsényi, Z. macroBiome: A Tool for Mapping the Distribution of the Biomes and Bioclimate. <https://github.com/szelepcsenyi/macroBiome>
10. Potapov P, Hansen MC, Pickens A, Hernandez-Serna A, Tyukavina A, Turubanova S, Zalles V, Li X, Khan A, Stolle F, Harris N, Song X-, Baggett A, Kommareddy I and Kommareddy A (2022) The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. *Front. Remote Sens.*
11. Friedl, M. A., Sulla-Menashe, D., Tan, B., Schneider, A., Ramankutty, N., Sibley, A., and Huang, X. (2010). MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 114, 168–182.