

**ВЛИЯНИЕ ХОДА РАЗРУШЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ГОДОВОЙ ХОД
ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI КАК ИНДИКАТОРА
ФИТОПРОДУКЦИОННОГО ПРОЦЕССА НА СТЕПНОМ ПЛАТО
В ЗАПОВЕДНИКЕ «ШАЙТАН-ТАУ»**

М.М. Шлюпикова, *А.В. Хорошев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва
e-mail: *avkh1970@yandex.ru

Исследована зависимость годового режима фитопродукции от неравномерности схода снежного покрова в лесостепи Южного Урала. Повторяемость снежных ситуаций в апреле оценена по индексу NDSI. Сезонный ход зеленой фитомассы оценен по многолетнему ряду индекса NDVI. Мезофиты доминируют в случае позднего снеготаяния вблизи лесов и в ложбинах, что способствует малому сокращению фитомассы после раннелетнего пика. Ксерофиты доминируют при раннем снеготаянии после зимнего сдувания снега в долины; раннелетний пик накопления фитомассы сменяется быстрым ее сокращением.

Ключевые слова: NDSI, NDVI, зеленая фитомасса, сезонный ход, повторяемость снежных ситуаций, снеготаяние, гидротермические условия, ландшафтное соседство, Южный Урал.

Введение

Внутрисезонная и межгодовая динамика фитопродукционного процесса привлекает пристальное внимание исследователей в связи с проблемами прогнозирования ресурсообеспеченности и чувствительности ландшафтов к климатическим изменениям [1, 2]. Неодинаковая инерционность фитоценозов по отношению к гидротермическим флуктуациям в зависимости от почвенно-геоморфологических условий требует составления локально-специфичных моделей, учитывающих позиционные факторы трансформации потоков вещества.

Возможности непосредственных массовых измерений фитомассы, позволяющих получить площадное континуальное представление о фитопродукционном процессе, ограничены в силу трудоемкости [1]. В равной степени это относится и к характеристикам снежного покрова, который при недостаточном увлажнении может вносить решающий вклад в функционирование ландшафта, а также – в динамику влагозапасов в почве. Поэтому практически безальтернативным методом на современном этапе становится анализ индексов, рассчитываемых по многоканальным космическим снимкам, и полевая верификация их содержания. Для получения регулярной информации в региональном масштабе обычно применяют материалы съемки спутника MODIS, но для более детальной информации локального масштаба приходится опираться на данные Landsat с разрешением 30 м и выявлять особенности сезонного хода на основании многолетнего ряда данных. В последнее время получен ряд уточнений об информативности нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI), который в первом приближении характеризует зеленую фитомассу, но в степях отражает также динамику соотношения живой и мертвой фитомассы [3-5]. Меньше данных имеется о видах связи NDVI с другими площадными индикаторами функционирования, в частности – зимних состояний. Хорошо известна зависимость фитопродуктивности от снегозапасов [6]. Однако мало внимания уделялось роли временной организации снежного покрова во внутрисезонной динамике фитомассы и видовом составе фитоценозов, особенно – информативности хода его разрушения для понимания динамики влагозапасов в почве. Несмотря на специфику каждого конкретного года, каждый тип фитоценозов имеет свою характерную кривую фитопродукционного процесса. По скорости

нарастания и сокращения фитомассы можно судить о сезонном ходе тепло- и влагообеспеченности, то есть косвенно судить и о почвенном климате.

Нормализованные разностные снежные индексы (NDSI) получили широкое применение при изучении снежного и ледового покрова, как правило – в аспекте сезонной и межгодовой динамики их площадей или расчетов снегозапасов [7-11]. Индекс применяется для оценки степени загрязнения твердыми частицами по отражательной способности снега [12], прогнозирования весеннего стока [13, 14]. Применительно к связям с растительным компонентом ландшафта NDSI рассматривается как индикатор маскирующей роли снега при оценке фитомассы по вегетационным индексам [7, 15-17]. Вопрос об индикации возможной связи между зимне-весенними и летними состояниями на основании временных рядов соответственно NDSI и NDVI пока, видимо, не изучался.

Цель нашей работы – проверка гипотезы о зависимости годового режима фитопродукционного процесса от неравномерности схода снежного покрова и ландшафтного соседства в условиях слабodefицитного увлажнения. В условиях отсутствия непосредственных измерений снежного покрова и фитомассы предполагалось, что годовой ход NDVI различается в зависимости от скорости истощения весеннего избытка влаги в почве, которая, в свою очередь, зависит от времени освобождения поверхности от снега. В случае позднего снеготаяния период поздневесеннего нарастания температур совпадает с высокими влагозапасами в почве, что продлевает вегетацию на значительную часть лета. При таких условиях мезофиты получают преимущество над ксерофитами, а фитомасса может быть большой. Наоборот, при раннем снеготаянии во время быстрого роста температур почва уже близка к истощению влагозапасов, и поэтому закономерно наступает летний перерыв вегетации, то есть создаются условия для преобладания ксерофитных сообществ с более низкой фитомассой.

Материалы и методы

Территория исследования охватывает часть низкогорно-лесостепного ландшафта в заповеднике «Шайтан-Тау» вблизи границы Оренбургской области и Башкортостана. На хребте Шайтан-Тау находится уникальный по размерам ненарушенный крупный массив дубравной лесостепи на восточной границе ареала [18, 19]. Объектом исследования стала приводораздельная часть ступенчатого плато (центр – 51°39'34" с.ш. 57°23'03" в.д.) на высотах 535-553 м площадью 153,7 га. Ширина плато варьирует от 250 до 1100 м. Плато сложено верхнемеловыми глауконитово-кварцевыми песками и галечниками. Оно преимущественно покрыто разнотравно-перистоковыльными и разнотравно-кострецовыми степями, которые и являлись объектом исследования. В почвенном покрове преобладают черноземы глинисто-иллювиальные маломощные легкосуглинистые. В краевых секторах рельеф осложнен водосборными понижениями глубиной 0,5-1,5 м, где к степным ксерофитам примешиваются ксеромезофиты и мезофиты (*Dactylis glomerata*, *Filipendula vulgaris*, *Sanguisorba officinalis*, *Seseli libanotis* и др.). Степные урочища плоских поверхностей окаймлены дубовыми редколесьями и кустарниковыми сообществами (преимущественно из *Spiraea hypericifolia*), занимающими часть плато, а также придолинных склоны и склоны смежных лощин (рис. 1). В краевой части плато на пологих и слабопокатых придолинных склонах под кустарниковой и травянистой растительностью встречаются литоземы темногумусовые мелкие легкосуглинистые и литоземы темногумусовые глинисто-иллювирированные. На смежных крутых и покатых склонах под дубовыми лесами с вторым ярусом из вяза, липы, клена доминируют серые лесные почвы. В глубоковрезанных лощинах, начинающихся у края плато, для дубовых лесов характерны *Lonicera pallasii*, *Padus aviculare*, *Chamaecytisus ruthenicus*, а в травостое – *Stellaria holostea*, *Alliaria petiolata*, *Heracleum sosnowskyi*, *Milium effusum*, *Chelidonium majus*.

Для плато имеются данные полевых исследований 2016-2024 гг., в том числе 22 комплексных описания видового состава, проективного покрытия, высоты, ярусной структуры фитоценозов, мощности почвенных горизонтов.

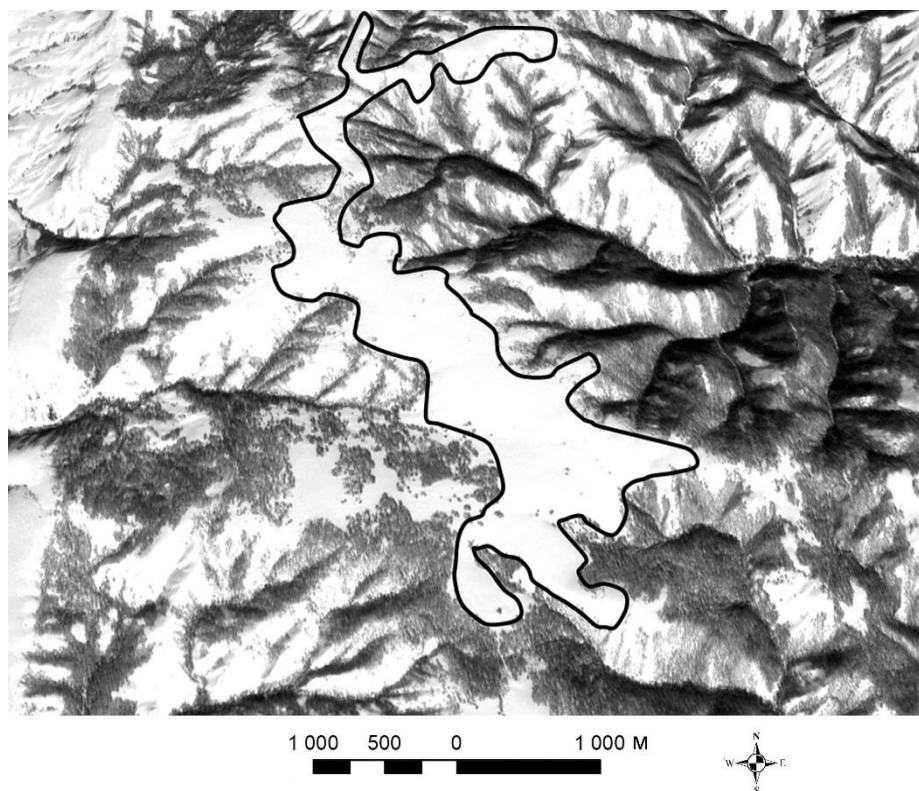


Рисунок 1 – Степное плато «Шайтан-Тау» в зимнем состоянии (обведено черной линией). Источник – Google Earth. Дата съемки 14.03.2007 г.

Общая схема исследования представлена на рисунке 2. Границы приводораздельной части плато, покрытые степными фитоценозами, оцифрованы вручную по данным цифровой модели рельефа по топографической карте 1:50 000. Если при плохо выраженном перегибе рельефа степные фитоценозы выходили за пределы плоской поверхности на пологий придолинный склон (до 3°), то они также считались принадлежащими плато. Границы степных и смежных лесных и кустарниковых фитоценозов, частично также присутствующих на плато, оцифрованы вручную по данным космоснимка 16.06.2024 г. (компания Airbus, источник – Google Earth). Соответствующие полигоны переведены в растр средствами ГИС ArcMap 10.8, которая использовалась и для последующих процедур. Ранее были установлены характерные для заповедника геоморфологические ниши лесного, кустарникового и степного типов растительности, выявлены типичные химические свойства почв под ними, показаны возможные тенденции смещения границ [20]. Выбор объекта (группа степных урочищ на поверхности плато) обусловлен необходимостью снизить количество факторов, влияющих на ход разрушения снежного покрова и годовой ход NDVI, чтобы исследовать эффекты ландшафтного соседства при прочих равных условиях.

Для расчета вегетационного индекса NDVI использованы данные 51 космоснимка спутников Landsat 5, 7, 8 и 9, разрешением 30 м, с 1999 по 2020 гг., с апреля по октябрь. Для расчета NDSI использованы 34 безоблачные снимка Landsat 5, 7, 8 и 9 с разрешением 30 м, с 1985 по 2022 гг., равномерно характеризующие период 1-30 апреля, т.е. обычное время схода снежного покрова, при различных гидротермических условиях (табл. 1). Используются данные о средних температурах апреля и марта года космосъемки и осадках холодного периода, предшествовавшего снеготаянию, которое обычно приходится на апрель (табл. 1). Под осадками холодного периода понимается сумма осадков января, февраля, марта года космосъемки и ноября и декабря предыдущего года, т.е. месяцев с отрицательными средними температурами. Метеорологические данные (1967-2023 гг.) взяты для станции Зилаир [21], расположенной в сопоставимых высотно-поясных и гипсометрических (514 м) условиях на расстоянии 65 км к северу от объекта исследования.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

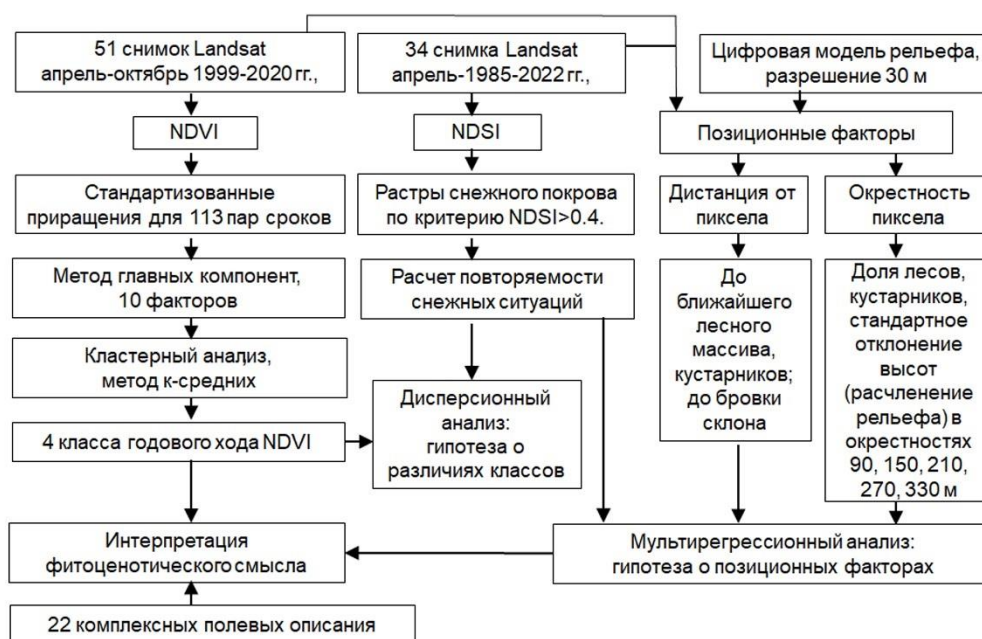


Рисунок 2 – Схема исследования. NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс, NDSI – нормализованный разностный снежный индекс.

Таблица 1 – Даты космосъемки Landsat, использованной для расчета снежного индекса NDSI, доля площади под снегом и характеристики предшествующих гидротермических условий (по данным метеостанции Зилаир)

№	Дата	Осадки холодного периода (мм)	Средняя температура марта	Средняя температура апреля	Доля площади под снегом, %
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1	01.04.1996	191,3	-8,7	-0,7	100
2	01.04.2010	160,3	-6,5	4,1	100
3	01.04.2022	199,8	-8,0	7,9	100
4	02.04.1993	226,1	-8,1	1,2	100
5	03.04.2014	249,2	-3,5	1,6	90
6	04.04.1988	210,0	-5,8	4,4	99
7	04.04.1991	239,8	-7,5	7,8	99
8	04.04.1997	267,8	-3,5	4,4	71
9	07.04.2018	118,8	-9,5	3,1	100
10	09.04.1993	226,1	-8,1	1,2	100
11	10.04.1996	191,3	-8,7	-0,7	100
12	11.04.2008	285,2	-1,5	5,5	0
13	12.04.2014	249,2	-3,5	1,6	100
14	15.04.2015	157,9	-4,7	3,0	73
15	15.04.2021	129,3	-7,8	5,0	4
16	16.04.1998	223,6	-7,1	-0,7	55
17	16.04.2001	280,8	-4,0	5,6	49
18	17.04.2019	187,8	-2,6	4,4	0
19	18.04.1993	226,1	-8,1	1,2	92
20	18.04.2022	199,8	-8,0	7,9	0
21	19.04.2014	249,2	-3,5	1,6	95
22	20.04.1988	210,0	-5,8	4,4	0

1	2	3	4	5	6
23	20.04.2000	243,9	-5,3	7,7	3
24	23.04.1998	223,6	-7,1	-0,7	14
25	23.04.2001	280,8	-4,0	5,6	0
26	24.04.1995	241,3	-3,5	10,6	0
27	25.04.2013	260,7	-4,9	6,5	0
28	26.04.2002	274,3	-1,8	0,4	25
29	27.04.2011	228,9	-8,4	4,0	0
30	27.04.2017	260,4	-5,7	3,6	0
31	28.04.1985	191,3	-8,4	2,6	0
32	28.04.2014	249,2	-3,5	1,6	46
33	29.04.1991	239,8	-7,5	7,8	0
34	30.04.2009	130,1	-3,5	1,4	0
Среднее за 1967-2023 гг.		219	-7,0	3,5	Нет данных

В качестве показателя наличия либо отсутствия снежного покрова в каждом пикселе в конкретную дату использовался «снежный индекс» NDSI, который рассчитывался по формуле:

$$NDSI = (GREEN - SWIR_1) / (GREEN + SWIR_1) [8] \quad (1)$$

где GREEN – коэффициент спектральной яркости в зеленой зоне спектра с длиной волны 0,525-0,6 мкм, SWIR₁ – в коротковолновой инфракрасной зоне с длиной волны 1,56-1,66 мкм.

Пиксели со значениями снежного индекса NDSI больше 0,4 принимаются за заснеженные не менее, чем на 50 % [8]. Расчет NDSI произведен для апреля 1985-2022 гг., т.е. для месяца, когда обычно происходит постепенное разрушение снежного покрова. Три декады апреля обеспечены примерно одинаковым количеством снимков: 1) 1 – 10 апреля (11 снимков), 2) 11 – 20 апреля (12 снимков), 3) 21 – 30 апреля (11 снимков). В растровой форме значение снежного индекса NDSI больше 0,4 – кодировалось как 1 (наличие снега), меньше – как 0. В программе Statistica 7.0 рассчитана повторяемость снежных ситуаций в апреле для каждого пиксела как косвенный признак длительности залегания снега. Чем выше значение данного показателя, тем дольше снег лежит в пределах пиксела; чем меньше, тем раньше он обычно стаивает.

Динамика растительного покрова рассматривалась как отклик на время освобождения от снежного покрова. В качестве основного показателя рассматривалась зеленая фитомасса, оцененная по вегетационным индексам NDVI. Вегетационный индекс растительности основан на отражательной способности листьев в ближней инфракрасной области спектра и на возможности поглощения солнечной радиации хлорофиллом. NDVI рассчитан по формуле:

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED}) [15], \quad (2)$$

где R_{NIR} – коэффициент спектральной яркости в ближней инфракрасной зоне, R_{RED} – в красной.

Для интерпретации чувствительности динамики фитомассы к длительности залегания снежного покрова использовалась классификация операционных территориальных единиц (пикселов) по годовому ходу NDVI как индикатора зеленой фитомассы. Классификация получена в ходе двухэтапной процедуры. На первом этапе стандартизованные приращения NDVI за интервалы между всеми возможными парами сроков (всего 113 пар) в течение каждого года были использованы как переменные при выделении 10 факторов динамики методом главных компонент. Затем полученная совокупность факторных значений была подвергнута классификации методом кластерного анализа (K-средних). После перебора нескольких вариантов дробности классификации, мы остановились на выделении 4 классов

годового хода NDVI на основании максимально достоверного различия их по повторяемости снежных ситуаций методом дисперсионного анализа. Таким способом проверялась гипотеза, что разные классы годового хода соответствуют разной повторяемости снежных ситуаций в апреле.

В качестве позиционных факторов использовались расстояния до бровки склона, ближайшего кустарникового и лесного массива (Евклидово расстояние), доли лесов и кустарников в окрестности каждого пиксела. Доли лесных и кустарниковых фитоценозов рассчитаны с использованием модуля фокальных статистик соседства в окрестностях с радиусом 90, 150, 210, 270, 330 м. Расчлененность рельефа для таких же окрестностей рассчитывалась как стандартное отклонение абсолютных высот по цифровой модели рельефа с разрешением 30 м.

Для проверки гипотезы о значимости позиционного фактора для скорости снеготаяния применен мультирегрессионный анализ. В качестве независимой переменной использовалась повторяемость снежной ситуации, в качестве независимых – позиционные факторы: расстояние до бровки склона, расстояния до ближайших лесных массивов и кустарниковых сообществ, доля лесов в окрестностях 90, 150, 210, 270, 330 м, закустаренность в окрестностях 90, 150, 210, 270 и 330 м.

Результаты и обсуждение

По гипотезе, длительность периода освобождения плато от снежного покрова определяется количеством осадков холодного периода и температурами апреля и предшествующего марта (табл. 1). В малоснежные зимы сумма осадков за 57-летний период не превышала 181 мм (нижний квартиль). В многоснежные годы (выше верхнего квартиля – 255 мм) большее количество влаги, поступающей в почву при снеготаянии, по гипотезе, способствует росту обилия мезофильных и ксеромезофильных видов, по сравнению с ксерофитами.

На основании расчетов площади снежного покрова по индексу NDSI установлен типичный ход снеготаяния, которое происходит в течение апреля. В первой декаде апреля снег обычно полностью покрывает плато (табл. 1). Первая флуктуация с сокращением снежного покрова до 71 % площади плато зафиксирована 4 апреля (1997 г.). Однако в большинство лет до конца первой декады плато практически полностью находится под снегом. Первый этап значительного разрушения снежного покрова происходит во второй декаде апреля. Например, после малоснежных зим 2015 г. и 2021 г. (158 мм) 15 апреля снег покрывал, соответственно, 73 % и 4 %. Наиболее рано от снега освобождались узкие и мысовидные части плато, окруженные крутыми склонами. Однако в отдельные годы даже во второй декаде почти все плато может оставаться под снегом, как, например 18.04.1993 (92 %) и 19.04.2014 (95 %). Причинами были многоснежные зимы, холодный апрель и холодный март 1993 г. (табл. 1).

Полное разрушение снежного покрова происходит в третью декаду апреля. Исключение составлял холодный апрель 2014 г. после многоснежной зимы (46 % территории под снегом 28 апреля). По мере освобождения от снега постепенно наступает фаза вегетации растительных сообществ. В третьей декаде апреля вегетация начинается повсеместно, кроме краевых приопушечных секторов: на более чем четверти территории NDVI превышает 0,11-0,14. Обратная корреляция Пирсона между NDVI и NDSI может достигать -0,52. Повторяемость, или вероятность, снежных ситуаций в апреле показана на рисунке 3.

На длительность деградации снежного покрова влияет сочетание средних температур марта и апреля при недостоверном вкладе сумм осадков холодного периода (рис. 4). После холодного (менее -6°C) марта быстрое разрушение снежного покрова происходит в середине апреля, в то время как после теплого марта (более -3°C) – уже в первой декаде (рис. 4, А). Если средняя температура апреля превышала +6°C, то почти полное разрушение снежного покрова происходило в конце второй декады; при холодном апреле – не ранее конца третьей декады (рис 4, Б).

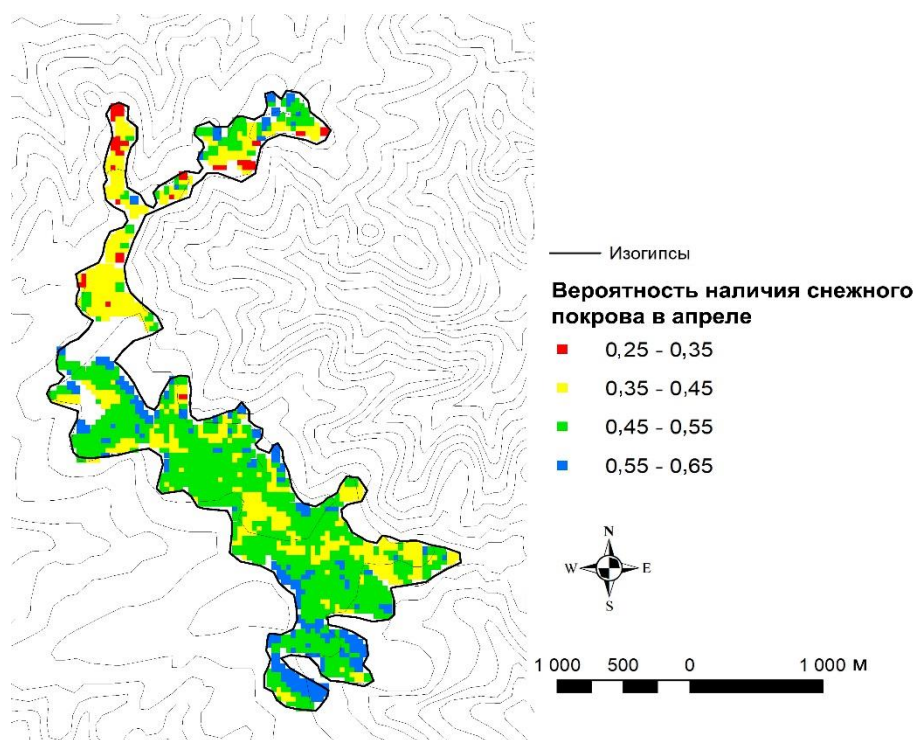


Рисунок 3 – Вероятность наличия снежного покрова в апреле по данным 34 снимков Landsat за 1985-2022 гг. Цветовой фон в пределах плато не показан на участках с древесной порослью

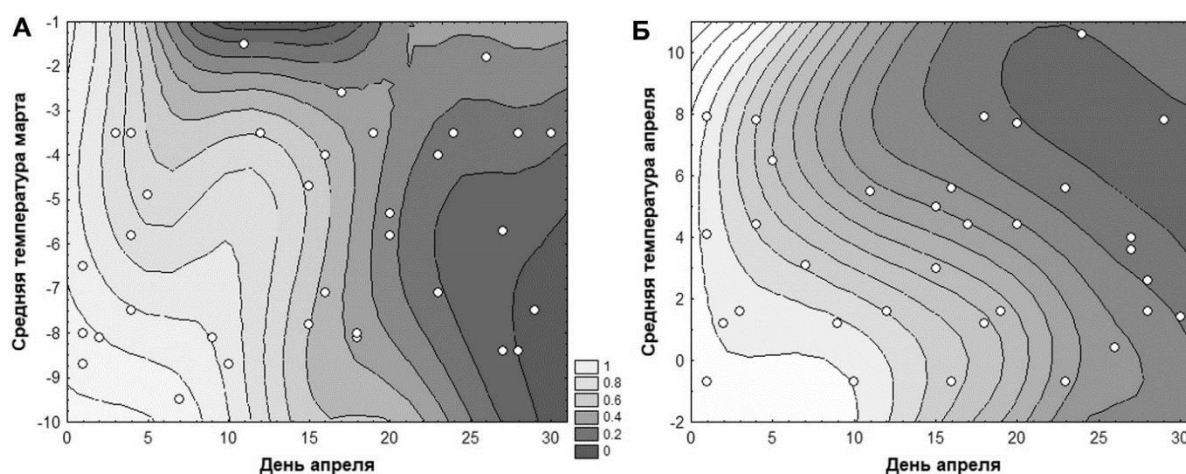


Рисунок 4 – Зависимость доли снегопокрытой площади (по снежному индексу NDSI) в апреле от средней температуры марта (А) и апреля (Б). Точками показаны даты расчета NDSI, обеспеченные безоблачными космическими снимками Landsat за разные годы в период 1985-2022 гг. Интерполяция методом наименьших квадратов со взвешиванием по дистанции

Проверка гипотезы о зависимости повторяемости снежных ситуаций в апреле от позиционных факторов показала следующее (табл. 2). Мультирегрессионная модель описывает 30 % дисперсии. Судя по положительным регрессионным коэффициентам, чем больше доля лесов и кустарников в окрестностях 90-210 м, тем дольше лежит снег в степных урочищах в течение апреля. Это особенно характерно для юго-восточного сектора, где при плоском рельефе часть плато занята дубравами. Отрицательный регрессионный коэффициент свидетельствует об уменьшении повторяемости снежных ситуаций на плоской поверхности

плато по мере роста расчлененности рельефа в окрестности 330 м, причем независимо от солярной экспозиции примыкающих склонов.

Таблица 2 – Мультирегрессионная модель зависимости повторяемости снежных ситуаций от позиционных факторов. Коэффициент детерминации $-0,30$, $p = 0,0000$. В расчет включены 1708 пикселей. Жирным курсивом выделены достоверные предикторы

Независимая переменная (в скобках – радиус окрестности расчета)	Стандартизованный регрессионный коэффициент	Регрессионный коэффициент	Уровень значимости
Свободный член уравнения		0,54	0,00
Расстояние до бровки склона	0,008	0,00	0,77
Расстояние до кустарников	0,14	0,00	0,00
Расстояние до лесного массива	-0,201	-0,00	0,00
Лесистость (90 м)	0,39	0,004	0,00
Лесистость (150 м)	-0,59	-0,002	0,001
Лесистость (210 м)	0,61	0,001	0,001
Лесистость (270 м)	-0,28	-0,00	0,00
Лесистость (330 м)	-0,45	-0,00	0,00
Закустаренность (90 м)	0,16	0,005	0,00
Закустаренность (150 м)	-0,25	-0,004	0,001
Закустаренность (210 м)	0,20	0,002	0,032
Закустаренность (270 м)	0,07	0,00	0,53
Закустаренность (30 м)	-0,02	-0,00	0,83
Расчлененность рельефа (90 м)	0,02	0,001	0,47
Расчлененность рельефа (150 м)	-0,009	-0,00	0,83
Расчлененность рельефа (210 м)	0,02	0,00	0,71
Расчлененность рельефа (270 м)	-0,07	-0,001	0,40
Расчлененность рельефа (330 м)	-0,19	-0,002	0,006

На следующем этапе проверялась гипотеза о влиянии повторяемости снежных ситуаций на годовой режим зеленой фитомассы. Применялся дисперсионный анализ, где в качестве группирующей переменной выступали классы годового хода NDVI, а в качестве зависимой – повторяемость снежных ситуаций в апреле. Установлены соответствия между классами годового хода зеленой фитомассы (согласно значениям NDVI) (рис. 5) и повторяемостью снежных ситуаций в апреле (рис. 6).

Класс 1 годового хода NDVI наиболее распространен в широком центральном секторе плато, распахивавшемся (с посевом костреца) до начала 2000-х гг. Он характеризуется замедленным нарастанием NDVI к середине июня до 0,4 и удержанием этих значений во второй половине лета, но при больших межгодовых колебаниях. Повторяемость снежных ситуаций средняя (0,46-0,55). В фитоценозе доминируют разнотравно-степномятликово-перистоковыльно-кострецовые сообщества с участием мезофитов и ксеромезофитов: *Bromopsis inermis*, *Elytrigia repens*, *Melampyrum arvense*, *Euphorbia seguierana*, *Hieracium echioides*, *Pulsatilla patens*, *Rumex acetosa*, *Polygala comosa*.

Класс 2 распространен преимущественно в юго-восточном секторе в пределах водосборных понижений и разделяющей их пологосклонной седловины. NDVI нарастают к середине июня до 0,6-0,7, а с июля уменьшаются до 0,4-0,5. Повторяемость снежных ситуаций несколько больше (0,50-0,55) за счет накопления снега в понижениях плато. Представлены мезофитные и ксеромезофитные разнотравно-таволгово-кострецовые сообщества.

Класс 3 доминирует в северном узком секторе плато, окруженном глубокооврезанными долинами, особенно с востока. Он характеризуется типично степным годовым ходом NDVI с быстрым ростом от апреля к концу мая до 0,7-0,8 и сильным уменьшением во второй половине

лета до 0,3-0,4. Повторяемость снежных ситуаций минимальна (0,25-0,40) за счет метелевого сдувания снега зимой и быстрого стаивания во второй половине апреля. Истощение влаги в почве наступает наиболее рано, что обуславливает господство разнотравно-тонконогово-перистоковыльных степей с доминированием ксерофитов и мезоксерофитов при участии ксеромезофитных эфемероидов: *Stipa pennata*, *Koeleria cristata*, *Poa transbaicalica*, *Salvia stepposa*, *Hieracium echioides*, *Pulsatilla patens*.

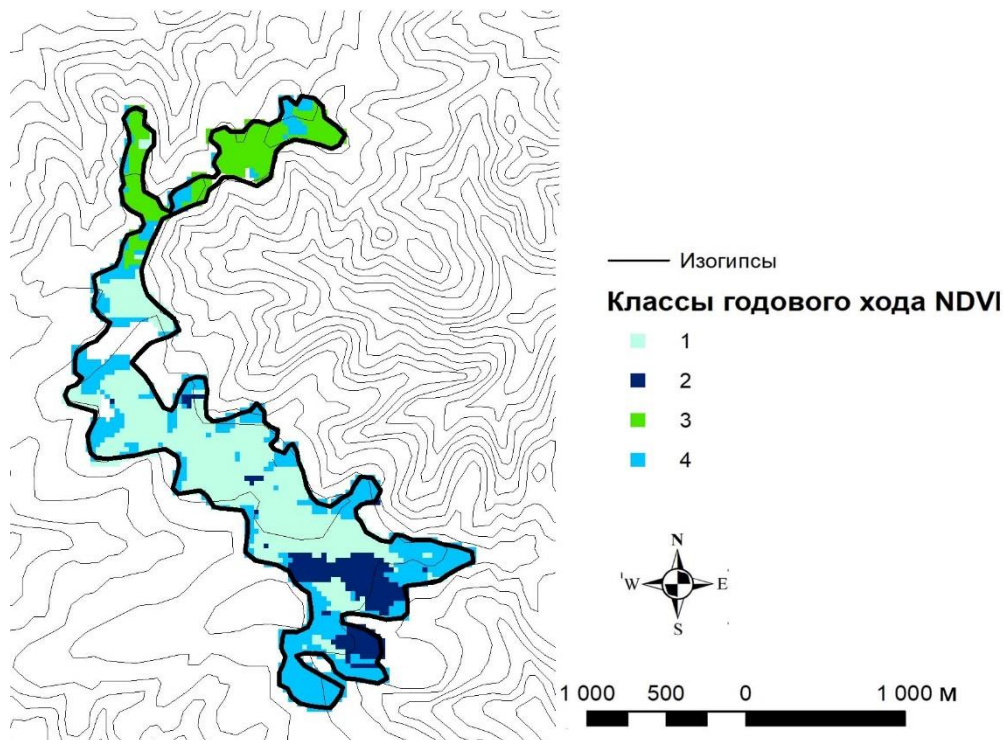


Рисунок 5 – Распространение классов годового хода зеленой фитомассы (по NDVI) на степном плато Шайтан-Тай (содержание классов – см. в тексте).

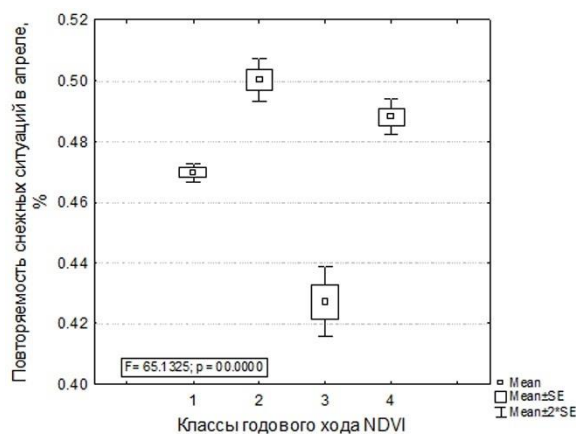


Рисунок 6 – Повторяемость снежных ситуаций в апреле для классов годового хода NDVI. Mean – среднее значение, SE – стандартная ошибка. F – критерий Фишера, p – уровень значимости (содержание классов – см. в тексте).

Класс 4 приурочен к краевым секторам плато вблизи смежных лесных и кустарниковых массивов, задерживающих метелевый снег. NDVI нарастает к началу июня до 0,7-0,8, а к июлю-августу падает до 0,4-0,5. Повторяемость снежных ситуаций высокая – до 0,5-0,6. Распространены таволгово-тимофеевково-кострецово-степномятликовые сообщества с преобладанием мезофитов и ксеромезофитов, местами с подростом осины: *Bromopsis inermis*, *Dactylis glomerata*, *Poa transbaicalica*, *Phleum phleoides*, *Filipendula vulgaris*, *Fragaria viridis*,

Galium verum, Potentilla goldbachii, Sanguisorba officinalis, Inula hirta, Seseli libanotis, Vicia cracca.

Повторяемость и встречаемость снежных ситуаций на степном плато Шайтан-Тау в апреле зависит как от теплообеспеченности марта и апреля, так и от факторов ландшафтного соседства. При общей очевидной положительной связи между температурами и долей снегопокрытой площади, скорость схода снега определяется не только температурами и осадками, но и растительным покровом смежных урочищ. Высокая повторяемость снежных ситуаций (т.е. замедленное снеготаяние) в краевых секторах плато обусловлена наличием лесных массивов. Последние способствуют задержанию снега при метелевом переносе в зимний период и увеличению количества влаги в почве. В условиях степи это способствует росту фитомассы за счет мезофильных видов. Минимальная повторяемость снежных ситуаций (т.е. раннее снеготаяние) характерна для участков, отдаленных от лесных массивов, но близких к крутым склонам долин, куда может сдуваться снег при метелевом переносе. Это доказывается чувствительностью режима таяния снежного покрова к расчлененности рельефа в окрестности с радиусом около 300 м, то есть к соседству с достаточно глубоко врезаемыми крутосклонными долинами и лощинами. Регрессионная модель показала, что леса и кустарники способствуют увеличению длительности снеготаяния на смежных степных участках за счет задержки метелевого снега. В результате может улучшаться возобновление деревьев и кустарников. С другой стороны, с начала 1980-х гг., по данным метеостанции Зилаир, количество осадков зимнего периода уменьшается примерно на 100 мм (кроме марта, для которого наблюдался рост почти на 20 мм) и за год при росте среднемесячных температур всех месяцев года на величину от 1,5° до (зимой) почти 4° и среднегодовой температуры на 2°. В связи с этим задержка снега в краевых частях плато с сопутствующим повышенным обилием мезофитов может сдерживать остепнение и снижать риск пожаров.

Наше исследование показало достоверные различия повторяемости снежных ситуаций между четырьмя классами годового хода NDVI. Чем дольше задерживается снежный покров, тем лучше выражены черты мезофитности степных сообществ («олуговельные» классы годового хода 2 и 4). При таких условиях не происходит сильного сокращения фитомассы во второй половине лета (как в ареале класса 3 с типично степным режимом) из-за более длительного сохранения запаса влаги в почве. При раннем снеготаянии (уже к концу второй декады апреля) быстрое нарастание температур истощает запас влаги. Тогда после июньского пика NDVI (максимальной зеленой фитомассы) наступает наиболее быстрое ее сокращение (класс годового хода 3), что соответствует нормальному ритму ксерофитных разнотравно-ковыльных степей. Принимая во внимание условия рельефа в ареале класса 3, правомерно заключить, что соседство с глубоко врезаемыми долинами при отсутствии защитной роли лесов и кустарников благоприятствует метелевому сносу снега в смежные лощины и долины при наиболее хорошей дренированности узкого сектора плато. Этим обеспечивается скудный влагозапас в почве, что благоприятно для типично степных разнотравно-ковыльных сообществ.

Таким образом, наше исследование показало, что различия годового хода зеленой фитомассы объясняются ландшафтными соседствами, контролирующими пространственно-временную организацию снеготаяния.

Выводы

1. Длительность схода снежного покрова на степном плато в низкогорно-лесостепном ландшафте заповедника «Шайтан-Тау» определяется как температурными условиями марта и апреля, так и ландшафтным соседством.

2. Наличие на плато лесных и кустарниковых массивов на расстоянии до 100-200 м способствует задержке метелевого снега, замедленному снеготаянию и росту доли мезофитов в степных урочищах.

3. Соседство с глубококоврезанными лощинами и крутыми склонами любых экспозиций в радиусе до 300 м сокращает длительность снеготаяния в краевых частях плато за счет метелевого сноса снега в зимний период.

4. Доминирование мезофитов над ксерофитами в фитоценозах плато обеспечивается в урочищах с поздним снеготаянием и задержкой вегетации, то есть вблизи лесов и в ложбинах, что способствует более длительному сохранению влаги в почве и малому сокращению фитомассы после раннелетнего пика.

5. Доминирование ксерофитов свойственно местообитаниям с ранним снеготаянием, быстрым истощением влагозапасов в почве, в результате чего раннелетний пик накопления зеленой фитомассы, индицируемой по NDVI, сменяется быстрым ее сокращением.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-17-00045).

Список литературы

1. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенюк Н. В., Тишков А.А., Ти Тран, Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыз Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.

2. de Jong R., Verbesselt J., Schaepman M.E., Bruin S.D. Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change // *Glob. Chang. Biol.* 2012. Vol. 18. No. 2. P. 642-655.

3. Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Оценка влияния мезорельефа склона на пространственную изменчивость свойств почвы и характеристики растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли // *Исследования Земли из космоса.* 2016. № 3. С. 66-74. DOI: 10.7868/S0205961416030052.

4. Piedallu C., Chéret V., Denux J.P., Perez V., Azcona J.S., Seynave I., Gégout J.C. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type // *Science of The Total Environment.* 2019. Vol. 651. Part 2. P. 2874-2885. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.052.

5. Хорошев А.В., Калмыкова О.Г., Дусаева Г.Х. Оценка индекса NDVI как источника информации о наземной фитомассе в степях // *Исследование Земли из космоса.* 2023. № 3. С. 27-43. DOI:10.31857/S020596142303003X.

6. Мордкович В.Г. Степные экосистемы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 170 с.

7. Klein A.G., Hall D.K., Riggs G.A. Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model // *Hydrol. Process.* 1998. Vol. 12. P. 1723-1744.

8. Hall D.K., Riggs G.A., Solomonson V.V. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms. NASA EOS-MODIS Doc. 2001. 55 p.

9. Дробышева О.В., Жуков А.П., Лагутин А.А., Синицин В.В. Спутниковый мониторинг снежного покрова на территории Алтайского края в 2017 году // *Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов: Труды Всероссийской конференции.* Новосибирск: Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, 2017. С. 176-179.

10. Куракина Н.И., Михайлова А.А. Картографическое моделирование снежного покрова в технологии геоинформационных систем // *Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ.* 2020. № 1. С. 23-27.

11. Raghubanshi S., Agrawal R., Rathore B.P. Enhanced snow cover mapping using object-based classification and normalized difference snow index (NDSI) // *Earth Science Informatics.* 2023. Vol. 16. P. 2813-2824. DOI: 10.1007/s12145-023-01077-6.

12. Крутских Н.В., Кравченко И.Ю. Использование космоснимков Landsat для геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. № 2. С. 159-168. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168.
13. Steele C., James D., Elias E. Evaluating MODIS snow products for modelling snowmelt runoff: Case study of the Rio Grande headwaters // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2017. Vol. 63. P. 234-243. DOI: 10.1016/j.jag.2017.08.007.
14. Морозова В.А. Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования // Современные проблемы территориального развития. 2019. № 2. С. 1-12.
15. Gamon J.A., Field C.B., Goulden M.L. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types // Ecological Applications. 1995. Vol. 5. No. 1. P. 28-41.
16. Lv Z., Pomeroy J.W. Detecting intercepted snow on mountain needleleaf forest canopies using satellite remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 231. P. 111222. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111222.
17. Zhang Q., Yao T., Huemmrich K.F. Evaluating impacts of snow, surface water, soil and vegetation on empirical vegetation and snow indices for the Utqiagvik tundra ecosystem in Alaska with the LVS3 model // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 240. P. 111677. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111677.
18. Дубравная лесостепь на хребте Шайтан-Тау и вопросы ее охраны / Под ред. Е.В. Кучерова. Уфа, 1994. 186 с.
19. Чибилёв А.А. Заповедник «Шайтан-Тау» – эталон дубравной лесостепи на Южном Урале. Оренбург: Печатный дом «Димур», 2015. 144 с.
20. Хорошев А.В., Леонова Г.М., Шарова Д.Е. Отношения леса и степи в заповеднике «Шайтан-Тау» (Южный Урал) // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 4. С. 598-610. DOI: 10.31857/S2587556620040081.
21. База данных метеостанций. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml>. (дата обращения: 15.07.2024).

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 25.07.2024
Принята к публикации 28.11.2024

THE EFFECT OF THE COURSE OF SNOW COVER DESTRUCTION ON THE ANNUAL COURSE OF THE NDVI VEGETATIVE INDEX AS AN INDICATOR OF THE PHYTOPRODUCTION PROCESS ON THE STEPPE PLATEAU IN THE SHAITAN-TAU RESERVE

M. Shlyupikova, A. *Khoroshev

Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow

e-mail: *avkh1970@yandex.ru

The research focused on the dependence of the phytoproductivity annual regime on the unevenness of snow cover in the forest-steppe of the Southern Urals. The frequency of snow situations in April was assessed using the NDSI. The seasonal variation of green phytomass was estimated using the long-term series of the NDVI. Mesophytic species dominate after late snowmelt near forests and in valleys; it contributes to a small decrease in phytomass after the early summer

peak. Xerophytic species dominate in case of early snowmelt after blowing of snow into valleys in the winter; the early summer peak of phytomass accumulation is followed by its rapid decrease.

Key words: NDSI, NDVI, green phytomass, seasonal cycle, frequency of snow, snowmelt, hydrothermal conditions, landscape neighborhood, Southern Urals.

References

1. Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Shmakova E.I., Snytko V.A., Dubynina S.S., Magomedova L.N., Nefed'eva L.G., Semenyuk N. V., Tishkov A.A., Ti Tran, Khakimzyanova F.I., Shatokhina N.G., Kyrgys Ch.O., Sambuu A.D. Biologicheskaya produktivnost' travyanykh ekosistem. Geograficheskie zakonomernosti i ekologicheskie osobennosti. Novosibirsk: IPA SO RAN, 2018. 110 s.
2. de Jong R., Verbesselt J., Schaepman M.E., Bruin S.D. Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change. *Glob. Chang. Biol.* 2012. Vol. 18. No. 2. P. 642-655.
3. Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Otsenka vliyaniya mezorel'efa sklona na prostranstvennyuyu izmenchivost' svoistv pochvy i kharakteristiki rastitel'nogo pokrova po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa.* 2016. N 3. S. 66-74. DOI: 10.7868/S0205961416030052.
4. Piedallu C., Chéret V., Denux J.P., Perez V., Azcona J.S., Seynave I., Gégout J.C. Soil and climate differently impact NDVI patterns according to the season and the stand type. *Science of The Total Environment.* 2019. Vol. 651. Part 2. P. 2874-2885. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.052.
5. Khoroshev A.V., Kalmykova O.G., Dusaeva G.Kh. Otsenka indeksa NDVI kak istochnika informatsii o nadzemnoi fitomasse v stepyakh. *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2023. N 3. S. 27-43. DOI:10.31857/S020596142303003X.
6. Mordkovich V.G. Stepnye ekosistemy. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo "Geo", 2014. 170 s.
7. Klein A.G., Hall D.K., Riggs G.A. Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model. *Hydrol. Process.* 1998. Vol. 12. P. 1723-1744.
8. Hall D.K., Riggs G.A., Solomonson V.V. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms. NASA EOS-MODIS Doc. 2001. 55 p.
9. Drobysheva O.V., Zhukov A.P., Lagutin A.A., Sinitsin V.V. Sputnikovyi monitoring snezhnogo pokrova na territorii Altaiskogo kraya v 2017 godu. Obrabotka prostranstvennykh dannykh v zadachakh monitoringa prirodnykh i antropogennykh protsessov: Trudy Vserossiiskoi konferentsii. Novosibirsk: Institut vychislitel'nykh tekhnologii Sibirskogo otdeleniya RAN, 2017. S. 176-179.
10. Kurakina N.I., Mikhailova A.A. Kartograficheskoe modelirovanie snezhnogo pokrova v tekhnologii geoinformatsionnykh system. *Izvestiya SPbGETU LETI.* 2020. N 1. S. 23-27.
11. Raghubanshi S., Agrawal R., Rathore B.P. Enhanced snow cover mapping using object-based classification and normalized difference snow index (NDSI). *Earth Science Informatics.* 2023. Vol. 16. P. 2813-2824. DOI: 10.1007/s12145-023-01077-6.
12. Krutskikh N.V., Kravchenko I.Yu. Ispol'zovanie kosmosnimkov Landsat dlya geoekologicheskogo monitoringa urbanizirovannykh territorii. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2018. N 2. C. 159-168. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-159-168.
13. Steele C., James D., Elias E. Evaluating MODIS snow products for modelling snowmelt runoff: Case study of the Rio Grande headwaters. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2017. Vol. 63. P. 234-243. DOI: 10.1016/j.jag.2017.08.007.
14. Morozova V.A. Raschet indeksov dlya vyyavleniya i analiza kharakteristik vodnykh ob"ektov s pomoshch'yu dannykh distantsionnogo zondirovaniya. *Sovremennye problemy territorial'nogo razvitiya.* 2019. N 2. S. 1-12.

15. Gamon J.A., Field C.B., Goulden M.L. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*. 1995. Vol. 5. No. 1. P. 28-41.
16. Lv Z., Pomeroy J.W. Detecting intercepted snow on mountain needleleaf forest canopies using satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 231. P. 111222. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111222.
17. Zhang Q., Yao T., Huemmrich K.F. Evaluating impacts of snow, surface water, soil and vegetation on empirical vegetation and snow indices for the Utqiagvik tundra ecosystem in Alaska with the LVS3 model. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 240. P. 111677. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111677.
18. Dubrav'naya lesostep' na khrebte Shaitan-Tau i voprosy ee okhrany. pod red. E.V. Kucherova. Ufa, 1994. 186 s.
19. Chibilev A.A. Zapovednik "Shaitan-Tau" – etalon dubravnoi lesostepi na Yuzhnom Urale. Orenburg: Pechatnyi dom "Dimur", 2015. 144 s.
20. Khoroshev A.V., Leonova G.M., Sharova D.E. Otnosheniya lesa i stepi v zapovednike "Shaitan-Tau" (Yuzhnyi Ural). *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2020. T. 84. N 4. S. 598-610. DOI: 10.31857/S2587556620040081.
21. Baza dannykh meteostantsii. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml>. (data obrashcheniya: 15.07.2024).

Сведения об авторах:

Шлюпикова Мария Михайловна
 Аспирант, географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
 Shlyupikova Maria
 Post-graduate student, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University

Хорошев Александр Владимирович
 Д.г.н., доцент, профессор, географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
 ORCID 0000-0001-5254-2651
 Khoroshev Alexander
 Doctor of Geographical Sciences, Docent, Professor, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University

Для цитирования: Шлюпикова М.М., Хорошев А.В. Влияние хода разрушения снежного покрова на годовой ход вегетационного индекса NDVI как индикатора фитопродукционного процесса на степном плато в заповеднике «Шайтан-Тай» // Вопросы степеведения. 2024. № 4. С. 15-28. DOI: 10.24412/2712-8628-2024-4-15-28