Многолетние тренды в состоянии растительности хребтов Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау по данным eMODIS NDVI C6 (2002–2019)

А. Г. Терехов^{1,2}, И. С. Витковская¹, Н. Н. Абаев^{2,3}, С. А. Долгих²

¹ *Институт информационных и вычислительных технологий МОН
Алматы, 050010, Казахстан
E-mail: aterekhov1@yandex.ru*

² *РГП «Казгидромет», Алматы, 050022, Казахстан
E-mail: terekhov_a@meteo.kz*

³ *Казахский национальный университет имени аль-Фараби
Алматы, 050040, Казахстан
E-mail: abayev.nurlan@gmail.com*

Продукт eMODIS NDVI C6 с 10-дневным периодом обновления, пространственным разрешением 250 м и архивом с 2002 по 2019 г., доступный на сайте программы Early Warning and Environmental Monitoring Program, использовался для мониторинга состояния естественной горной растительности, относящейся к альпийским (субальпийским) лугам и горным лесам Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау. В качестве сезонной характеристики состояния растительного покрова выступал накопленный за 10–31 июля максимум нормализованного относительного индекса растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Было рассмотрено 15 контуров, относящихся к хребтам Северного, Восточного, Внутреннего Тянь-Шаня, а также Джунгарского Алатау. В результате получено, что в период 2002–2016 гг. тренды многолетних изменений в значениях NDVI были мало выражены с направленностью на незначительное улучшение. Последние три года (2017–2019) имели аномальный характер и отличались очень высокими значениями NDVI, что сформировало тенденцию на улучшение состояния вегетации. Для анализа корреляционных связей в динамике растительности между различными регионами Тянь-Шаня был использован модифицированный индекс VCI (Vegetation Condition Index). Временные ряды NDVI были пересчитаны в индекс VCI с универсальной для всех контуров шкалой: 0 — многолетний минимум, 50 — среднее арифметическое анализируемого ряда отсчётов, 100 — многолетний максимум. Было получено, что основные изменения сводятся к относительному ухудшению состояния вегетации в Северном Тянь-Шане. Северный Тянь-Шань включает четыре хребта: Киргизский, Заилийский Алатау, Кунгей Алатау и Кетмень. Они отличаются от остальных хребтов Тянь-Шаня тем, что первыми взаимодействуют с атмосферными течениями (западный перенос), переносящими влагу. Таким образом, регистрируемые в течение 2002–2019 гг. относительные изменения в растительном покрове Тянь-Шаня могут трактоваться как следствие уменьшения эффективности взаимодействия передовых хребтов горной системы с западным атмосферным переносом и увеличения доли влаги, поступающей к внутренним хребтам.

Ключевые слова: NDVI, VCI, многолетняя динамика, Тянь-Шань, Джунгарский Алатау, изменения состояния растительности, альпийские (субальпийские) луга, горный лес

Одобрена к печати: 24.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-133-142

Введение

Изменение климата и многолетние тенденции погодных условий, связанные с увлажнённостью, представляют значительный практический интерес для аридных территорий Центральной Азии. Значимость этих вопросов возрастает для трансграничных речных бассейнов и обрамляющих их хребтов Тянь-Шаня. Вопросы водodelения трансграничного речного стока между Казахстаном и Китайской народной республикой (КНР) в отношении рек Черный Иртыш и Или, формирующих значительную часть своего стока на территории Синьцзян-Уйгурского автономного района (СУАР) КНР, в хребтах Северного, Восточного и Внутреннего Тянь-Шаня, стоят очень остро и находятся в процессе межгосударственного

обсуждения (Сборник..., 2008). Поэтому спутниковые оценки направленности многолетних изменений погодных условий региона трансграничных бассейнов, в данном случае хребтов Тянь-Шаня, в аспекте изменений их увлажнённости представляют значительный практический интерес.

Информация о режимах увлажнения зон формирования стока и современных тенденциях может быть получена на основе мониторинга состояния растительного покрова (Музылев и др., 2019). В условиях аридного климата Центральной Азии состояние естественной растительности прямо связано с увлажнённостью территории. В горных районах Центральной Азии под естественным растительным покровом понимается пояс альпийских, субальпийских лугов и хвойных лесов — высотная зона примерно от 1300 до 3800 м над уровнем моря. В горах Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау с понижением высоты над уровнем моря количество осадков резко падает, растительный покров быстро деградирует до уровня горных полупустынь и пустынь (Рубцов, 1946; Taft et al., 2011). Таким образом, в горных хребтах Центральной Азии присутствует высотный пояс с относительно развитой естественной растительностью, который представляет собой удобный объект для многолетнего спутникового мониторинга в задачах оценки изменений условий увлажнения этих территорий. Целью данной работы являлась диагностика тенденций в состоянии естественной горной растительности хребтов Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау в течение последних 18 лет (2002–2019).

Территория исследования

Территория обследования включала четыре горных региона: Северный, Восточный, Внутренний (Центральный) Тянь-Шань (Чупахин, 1964) и Джунгарский Алатау (Рубцов, 1946).

Рис. 1. Картограмма анализируемых масок растительного покрова. В Джунгарском Алатау: 1 — Северный хребет, 2 — Южный хребет; в Северном Тянь-Шане: 3 — Киргизский хребет, 4 — Заилийский Алатау, 5 — Кунгей Алатау, 6 — Кетмень; в Восточном Тянь-Шане: 7 — хребет Боро-Хоро, 8 — Экен-Хабырга, 9 — хребет Укен; во Внутреннем Тянь-Шане: 10 — Терскей Алатау, 11 — Кокшаал Тау, 12 — хребет Халык, 13 — хребет Нарат, 14 — хребет Борохотан, 15 — горы Борто-Ула

В их составе рассматривались следующие хребты: в Джунгарском Алатау — Северный (северный склон) и Южный хребты; в Восточном Тянь-Шане — хребты Боро-Хоро, Эрен-Хабырга, Укен (у всех — северный склон); в Северном Тянь-Шане — Киргизский хребет

(северный склон), Заилийский Алатау, Кунгей Алатау, хребет Кетмень; во Внутреннем (Центральном) Тянь-Шане — Терской Алатау (северный склон), хребты Нарат, Кокшаал-Тау (восточная часть, южный склон), Халыктау (южный склон), Борохотан (южный склон) и горы Барта-Ула (рис. 1, см. с. 134).

Спутниковые данные

Состояние естественного горного растительного покрова оценивалось с помощью нормализованного относительного индекса растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс). Использовался продукт Temporally Smoothed NDVI, eMODIS NDVI C6 программы Early Warning and Environmental Monitoring Program (<http://earlywarning.usgs.gov>). Он строится по данным спутника Aqua, радиометр MODIS, имеет архив с 2002 г. по текущий момент, 10-дневный период накопления и разрешение 250 м. Алгоритм обработки временных рядов NDVI (коллекция 6) для удаления влияния мешающих факторов в этом продукте основывается на построении огибающей по максимальным значениям (Swets et al., 1999). Поэтому наиболее представительные значения относятся к времени, близкому к сезонному максимуму NDVI. Для горной растительности Тянь-Шаня это конец июля, соответственно, для расчётов привлекалось по две декадные сцены в каждом сезоне — 2-я и 3-я декады июля.

Методика обработки спутниковых данных

Вегетационные индексы, среди которых наиболее популярный — NDVI, в формате многолетних временных рядов являются классическим инструментом для мониторинга территорий в различных задачах, в том числе и климатических исследованиях (Ichii et al., 2002), включая горную систему Тянь-Шань (Zhumanova et al., 2018). Временные ряды NDVI могут использоваться для описания как параметров сезонной динамики вегетации, так и их многолетних вариаций (Письман и др., 2018). В последнем случае целесообразно упрощение используемых параметров сезонной динамики NDVI до одного значения, например сезонного максимума, что облегчает обработку данных и трактовку результатов.

Многолетние (климатические) региональные изменения в состоянии растительности могут выражаться не только в трендах абсолютных величин NDVI, но и в наличии определённой динамики между состояниями вегетации различных частей анализируемой территории. Диапазоны значений NDVI, описывающие разные части территории, заметно различаются, поэтому требуется переход к сопоставимым шкалам. Для этого в работе применялся вегетационный индекс VCI (Vegetation Condition Index) (Kogan, 1995; Liu, Kogan, 1996), который использует шкалу символических единиц в диапазоне от 0 до 1,0. Для удобства этот численный диапазон часто трансформируют умножением на 100, после чего за 0 принимается многолетний минимум значений NDVI, зарегистрированный в данном месте в данное время, а за 100 — соответственно, многолетний максимум. Остальные значения NDVI пересчитываются в величины VCI в рамках линейной аппроксимации. Универсальная безразмерная шкала модифицированного индекса VCI одинакова для любого анализируемого объекта, что позволяет проводить сравнительный анализ.

В задачах межрегионального сравнения многолетних динамик условий вегетации лучше использовать модифицированный индекс условий (Терехов и др., 2015), в котором дополнительно используется третье фиксированное значение — середина шкалы (50), — приписываемое среднему арифметическому значению временного ряда. Такая трансформация важна, когда распределение значений во временном ряду ассиметрично, т.е. имеет место «тяжёлый хвост». Наличие асимметрии в распределении значений ряда отсчётов приводит к искажениям, и среднее арифметическое ряда NDVI при пересчёте в VCI часто не соответствует середине его шкалы (50). После применения модифицированной шкалы VCI все анализируемые объекты описываются в сопоставимых шкалах, где 0 — многолетний минимум, 50 — среднее

арифметическое ряда отсчётов, 100 — многолетний максимум. Таким образом, гарантировано сохраняется важное в метеорологии значение среднего. Эта ситуация даёт возможность более корректно проводить количественные сравнения между многолетними режимами условий вегетации отдельных контуров/регионов и, соответственно, более точно диагностировать пространственно-временные корреляционные связи.

Сцена еMODIS NDVI C6 с разрешением 250 м имеет пиксельный размер 17407×13676 и покрывает всю Центральную Азию (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/search/Asia/Central%20Asia>), в том числе и горные системы Тянь-Шань и Джунгарский Алатау. Предварительной процедурой строилась матрица максимумов NDVI периода 11–31 июля. Для этого накапливались максимальные значения из двух сцен — за 2-ю и 3-ю декады июля. На основе полученной сцены экспертным дешифрированием создавались маски естественного горного растительного покрова для выбранных хребтов (см. *рис. 1*). Естественный растительный покров этой высотной зоны хорошо выделяется среди окружающей территории. Выше расположена зона ледников и ледниковых морен, практически не имеющая растительного покрова. Ниже — в разных хребтах по-разному: иногда это зона горных полупустынь и пустынь с полностью высыхающими к июлю травяными сообществами, иногда — горные степи с сельскохозяйственными угодьями (сенокосами или поливной пашней).

Восемнадцать средних значений еMODIS NDVI C6 периода 2002–2019 гг. (одно значение в год) в пределах контуров анализируемых масок формировали временные ряды отсчётов, для которых определялся тренд (линейная аппроксимация). Маски отдельных хребтов агрегировались до масок четырёх отдельных регионов: Джунгарского Алатау, Северного, Восточного и Внутреннего Тянь-Шаня. Также формировалась общая маска, включающая всю анализируемую территорию. В работе проводился мониторинг обширной горной территории Центральной Азии размером примерно 1000×900 км. Поэтому помимо общей направленности в изменениях состояния растительного покрова за период 2002–2019 гг. также анализировались корреляционные связи между отдельными регионами.

Результаты

Временные ряды (2002–2019) значений еMODIS NDVI C6 всех 15 контуров, агрегированные для характеристики четырёх региональных масок и одной суммарной маски, представлены на *рис. 2* (см. с. 137). На *рис. 3* (см. с. 138) отображена динамика относительных изменений (разность VCI) в условиях вегетации для четырёх анализируемых регионов в сравнении с состоянием растительности в рамках общей маски. На *рис. 4* (см. с. 138) показаны сравнительные изменения условий вегетации (разность VCI) в период 2002–2019 гг. попарно между всеми регионами (все возможные комбинации). *Рисунок 5* отображает внутреннюю структуру динамики условий вегетации Северного Тянь-Шаня в аспекте отдельных составляющих его хребтов.

Обсуждение

Режимы вегетации естественной горной растительности Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау в период 2002–2016 гг., диагностируемые по величинам индексов NDVI (см. *рис. 2*), довольно стационарны и не имеют выраженных тенденций. Однако последние три года (для Восточного Тянь-Шаня — последние четыре года), особенно 2017 и 2019 гг., характеризовались существенно более высокими значениями NDVI, что внесло положительный момент в динамику состояния растительности. Следует отметить, что в Северном Тянь-Шане ситуация стабильна и тренд в значениях NDVI отсутствует на всём временном интервале 2002–2019 гг. Эта ситуация не повторяется в других регионах Тянь-Шаня. В Джунгарском Алатау аномально высокое значение NDVI было зарегистрировано только в 2019 г., т.е. этот регион по динамике растительности более близок к Северному Тянь-Шаню, чем к Восточному и Внутреннему.

Рис. 2. Динамика июльских (максимум 10–31 июля) значений вегетационного индекса NDVI в период 2002–2019 гг. для альпийских/субальпийских и хвойных лесов горных районов Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау. Крупными маркерами обозначены годовые значения NDVI, не включённые в расчёт линейного тренда. В качестве вегетационного индекса использовался продукт eModis NDVI C6 (разрешение 250 м)

Тянь-Шань — обширная горная зона, поэтому представляли интерес корреляционные связи в условиях вегетации между её различными частями в период мониторинга (2002–2019). Анализ разности значений VCI между региональной и общей маской растительности показал, что наиболее значимые изменения в условиях вегетации регистрируются только в Северном Тянь-Шане. Тенденции остальных регионов не имеют достоверно выраженной направленности (см. рис. 3).

Межрегиональные корреляционные связи представлены на рис. 4. Регистрируется относительное ухудшение условий вегетации в Северном Тянь-Шане. Попарное сравнение остальных районов не обнаруживает каких-либо значимо выраженных тенденций. Анализ пространственной структуры в условиях вегетации Северного Тянь-Шаня, проведённый через сопоставление режимов составляющих его хребтов (Киргизский, Заилийский Алатау, Кунгей Алатау и Кетмень), показал внутреннюю однородность и согласованность динамики разных частей этого региона (см. рис. 5, см. с. 139).

Рис. 3. Динамика различий в условиях вегетации (разность индексов VCI) в период 2002–2019 гг. между отдельными регионами Тянь-Шаня, включая Джунгарский Алатау, и анализируемой территорией в целом. Значения VCI строились на основе eModis NDVI C6 (разрешение 250 м)

Рис. 4. Динамика различий в условиях вегетации (разность индексов VCI) в период 2002–2019 гг. между анализируемыми регионами. Значения VCI строились на основе eModis NDVI C6 (разрешение 250 м)

Рис. 5. Динамика различий в условиях вегетации (разность индексов VCI) в период 2002–2019 гг. между отдельными хребтами Северного Тянь-Шаня и регионом в целом. Значения VCI строились на основе eModis NDVI C6 (разрешение 250 м)

Рис. 6. Частота регистрации нижней границы облачного покрова на высоте 300–600 м

Основное отличие хребтов Северного Тянь-Шаня от остальных частей горной системы заключается в том, что они первыми взаимодействуют с атмосферными течениями (западный перенос), переносящими влагу. Таким образом, регистрируемые в течение 2002–2019 гг. изменения в растительном покрове Тянь-Шаня могут трактоваться как следствие уменьшения эффективности взаимодействия передовых хребтов с западным переносом и увеличения доли влаги, поступающей во внутренние зоны Тянь-Шаня. Этот вывод соответствует фактическим наблюдениям над погодой в Алматы (Заилийский Алатау). В последние 5–7 лет в зимний период значительно реже стали наблюдаться явления инверсии температуры, приводящие к формированию низкого облачного покрова и ясного неба в высокогорной зоне. Сейчас

типичная зимняя погода в Заилийском Алатау может характеризоваться в том числе облачным покровом над самыми высокими вершинами (пик Талгар, 4973 м), что было практически невозможно увидеть ещё 10 лет назад. Режимные наблюдения над облачным покровом на метеостанции Алматы не включают регистрацию изменений в высотах облачного покрова выше 2500 м, поэтому нет возможности получить прямое подтверждение этого явления. Однако уменьшение частоты фиксации случаев зимней инверсии температур воздуха (низкий облачный покров) регистрируется (рис. 6, см. с. 139).

Заключение

Таким образом, состояние растительного покрова зоны альпийских (субальпийских) лугов и горных лесов в большей части Тянь-Шаня (Северный, Восточный и Внутренний), а также в Джунгарском Алатау в период 2002–2016 гг. было стабильно и не имело заметных тенденций к ухудшению/улучшению. Последние три года, особенно 2017 и 2019 гг., отличались аномально хорошим состоянием растительности, что сформировало предпосылки к улучшению.

Анализ корреляционных связей в условиях вегетации между регионами внутри исследуемой территории показал, что основная причина регистрируемых в период 2002–2019 гг. изменений локализована в Северном Тянь-Шане и выражена в относительном ухудшении условий для роста/развития естественной растительности на составляющих регион хребтах. Предположительной причиной может быть снижение эффективности перехвата осадков западного переноса на переднем фронте хребтов Тянь-Шаня (Северный Тянь-Шань) и, соответственно, большая доля влаги, достигающая хребтов Восточного и Внутреннего Тянь-Шаня.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проекты AP 05134241, AP05135848.

Литература

1. Музылев Е. Л., Старцева З. П., Зейлигер А. М., Ермолаева О. С., Волкова Е. В., Василенко Е. В., Осипов А. И. Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 44–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-44-60.
2. Письман Т. И., Ботвич И. Ю., Шевырногов А. П. Оценка состояния лесной растительности Красноярского края (заповедник «Столбы») по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 130–140. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-130-140.
3. Рубцов Н. И. Растительность Джунгарского Алатау. Алма-Ата: Академия наук КазССР, 1946. 184 с.
4. Сборник протоколов заседаний Казахстанско-Китайской совместной комиссии по использованию и охране трансграничных рек (2001–2008 гг.). 2008. 47 с. URL: http://www.cawater-info.net/library/rus/protokols_kaz-china.pdf (дата обращения: 16.05.2019).
5. Терехов А. Г., Макаренко Н. Г., Пак И. Т. Комбинированный индекс температурных условий и его применимость к описанию состояния сельскохозяйственной вегетации Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 31–40.
6. Чупахин В. М. Физическая география Тянь-Шаня (Природно-географические особенности, основные вопросы ландшафтного картирования и комплексного физико-географического районирования). Алма-Ата: Академия наук КазССР, 1964. 378 с.
7. Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y. Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990 // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23. Iss. 18. P. 3873–3878. DOI: 10.1080/01431160110119416.
8. Kogan F. N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection // Advances in Space Research. 1995. V. 15. Iss. 11. P. 91–100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
9. Liu W. T., Kogan F. N. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. Iss. 14. P. 2761–2782. DOI: 10.1080/01431169608949106.

10. Swets D., Bradley C. R., Rowland J., Marko S. E. A weighted least-squares approach to temporal NDVI smoothing // From image to information: Proc. ASPRS Annual Conf. 1999. URL: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70201050>.
11. Taft J. B., Phillippe L. R., Dietrich Ch. H., Robertson K. R. Grassland composition, structure, and diversity patterns along major environmental gradients in the Central Tien Shan // Plant Ecology. 2011. V. 212. Iss. 8. P. 1349–1361. DOI: 10.1007/s11258-011-9911-5.
12. Zhumanova M., Monnig C., Hergarten C., Darr D., Wrage-Monnig N. Assessment of vegetation degradation in mountainous pasture of the Western Tien-Shan, Kyrgyzstan, using eMODIS NDVI // Ecological Indicators. 2018. V. 95. Pt. 1. P. 527–543. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.07.060.

Long term trends in vegetation in Tien-Shan and Dzungarian Alatau from eMODIS NDVI C6 data (2002–2019)

A. G. Terekhov^{1,2}, I. S. Vitkovskaya¹, N. N. Abayev^{2,3}, S. A. Dolgikh²

¹ Institute of Information and Computing Technology MES, Almaty 050010, Kazakhstan
E-mail: aterekhov1@yandex.ru

² RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan
E-mail: terekhov_a@meteo.kz

³ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan
E-mail: abayev.nurlan@gmail.com

Product eMODIS NDVI C6 was used for monitoring the conditions of mountain alpine (subalpine) meadows and mountain forest zones of the Tien Shan and Dzungarian Alatau. The product is characterized by 10-day renewal, 250 m resolution, and an archive from 2002 to 2019, which is available on Early Warning and Environmental Monitoring Program website. The maximum NDVI values accumulated for 10–31 July were used as a seasonal characteristic of the vegetation cover conditions. Fifteen contours from the Northern, Eastern and Inner Tien Shan as well as the Dzungarian Alatau were considered in this paper. It was obtained that for the period 2002–2016, trends for long-term changes in the values of the vegetation index NDVI were poorly expressed with a slight improvement over the period. The last three years (2017–2019) were anomalous and characterized by high NDVI values, which formed a tendency for vegetation improvement. To analyze the correlation in vegetation dynamics in different regions of the Tien Shan, a modified Vegetation Condition Index (VCI) was used. NDVI time series were converted to VCI index with a universal scale for all contours, where 0 is long-term minimum; 50 is arithmetic average for the period; 100 is long-term maximum. It was found that the main changes are connected to a relative degradation of vegetation in the Northern Tien Shan that includes four ranges: Kyrgyz, Zailiysky Alatau, Kungei Alatau and Ketmen. Unlike other Tien Shan mountain ranges, the Northern Tien Shan is the first to interact with atmospheric currents (western transport) carrying moisture. Thus, the registered relative changes in the vegetation cover in the Tien Shan from 2002 to 2019 can be interpreted as a result of the efficiency decrease in interaction of the frontal Tien Shan ranges with western atmospheric transport and an increase in the proportion of moisture entering the inner ridges.

Keywords: NDVI, VCI, long-term dynamic, Tien-Shan, Dzungarian Alatau, vegetation change, alpine (subalpine) meadows, mountain forests

Accepted: 24.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-133-142

References

1. Muzylev E. L., Startseva Z. P., Zeyliger A. M., Ermolaeva O. S., Volkova E. V., Vasilenko E. V., Osipov A. I., Ispol'zovanie sputnikovykh dannykh o kharakteristikakh podstilayushchei poverkhnosti i meteorologicheskikh kharakteristikakh pri modelirovanii vodnogo i teplovogo rezhimov bol'shogo

- sel'skokhozyaistvennogo regiona (The use of satellite data on land surface and meteorological characteristics in modeling the water and heat regimes of large agricultural region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 44–60, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-44-60.
2. Pisman T. I., Botvich I. Yu., Shevyrnogov A. P., Otsenka sostoyaniya lesnoi rastitel'nosti Krasnoyarskogo kraia (zapovednik "Stolby") po sputnikovym dannym (Assessment of the state of forest vegetation in Krasnoyarsk Territory (Stolby Nature Reserve) according to satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 130–140, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-130-140.
 3. Rubtsov N. I., *Rastitel'nost' Dzhungarskogo Alatau* (Vegetation of Dzungarian Alatau), Alma-Ata: Academy of Sciences Kazakh SSSR, 1946, 184 p.
 4. *Sbornik protokolov zasedanii Kazakhstansko-Kitaiskoi sovместnoi komissii po ispol'zovaniyu i okhrane transgranichnykh rek (2001–2008 gg.)* (Collection of minutes of meetings of the Kazakh-Chinese joint Commission on the use and protection of transboundary rivers (2001–2008)), 2008, 47 p., available at: http://www.cawater-info.net/library/rus/protokols_kaz-china.pdf (accessed 16.05.2019).
 5. Terekhov A. G., Makarenko N. G., Pak I. T., Kombinirovannyi indeks temperaturnykh uslovii i ego primenimost' k opisaniyu sostoyaniya sel'skokhozyaistvennoi vegetatsii Kazakhstana (Composite index of temperature conditions and its applicability to the description of the state of agricultural vegetation in Kazakhstan), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 31–40.
 6. Chupakhin V. M., *Fizicheskaya geografiya Tyan'-Shanya (Prirodno-geograficheskie osobennosti, osnovnye voprosy landshaftnogo kartirovaniya i kompleksnogo fiziko-geograficheskogo raionirovaniya)* (Physical geography of the Tien Shan (Natural and geographical features, the main issues of landscape mapping and integrated physical and geographical zoning)), Alma-Ata: Academy of Sciences Kazakh SSR, 1964, 378 p.
 7. Ichii K., Kawabata A., Yamaguchi Y., Global correlation analysis for NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982–1990, *Intern. J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 23, Issue 18, pp. 3873–3878, DOI: 10.1080/01431160110119416.
 8. Kogan F. N., Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection, *Advances in Space Research*, 1995, Vol. 15, Issue 11, pp. 91–100, DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
 9. Liu W. T., Kogan F. N., Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, Issue 14, pp. 2761–2782, DOI: 10.1080/01431169608949106.
 10. Swets D., Bradley C. R., Rowland J., Marko S. E., A weighted least-squares approach to temporal NDVI smoothing, *From image to information: Proc. ASPRS Annual Conf.*, 1999, available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70201050>.
 11. Taft J. B., Phillippe L. R., Dietrich Ch. H., Robertson K. R., Grassland composition, structure, and diversity patterns along major environmental gradients in the Central Tien Shan, *Plant Ecology*, 2011, Vol. 212, Issue 8, pp. 1349–1361, DOI: 10.1007/s11258-011-9911-5.
 12. Zhumanova M., Monnig C., Hergarten C., Darr D., Wrage-Monnig N., Assessment of vegetation degradation in mountainous pasture of the Western Tien-Shan, Kyrgyzstan, using eMODIS NDVI, *Ecological Indicators*, 2018, Vol. 95, Part 1, pp. 527–543, DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.07.060.