

Морфологический анализ аномалий пространственного распределения весенних запасов снега в горных территориях Евразии в период 2001–2019 гг.

А. Г. Терехов^{1,2}, Н. Г. Макаренко^{1,3}

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

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

³ *Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140, Россия
E-mail: ng-makar@mail.ru*

Для морфологического анализа пространственно-временных особенностей в положительных аномалиях запасов воды в снежном покрове основных горных территорий Евразии, включающих Джунгарский Алатау, Тянь-Шань, Памир, Гиндукуш, Каракорум, Гималаи и Кунь-Лунь, использовался продукт Snow Water Equivalent Anomaly (SWEA) USGS FEWS NET за 30 апреля 2001–2019 гг. для Центральной Азии. Дескриптором паттернов сезонного распределения запасов воды в снежном покрове стала характеристика Эйлера, измеряющая топологию территорий выбросов значений SWEA за заданный уровень. Было обнаружено, что для шести уровней SWEA (0 мм, 10, 25, 50, 100 и 200 мм) в период с 2001 по 2019 г. регистрируются существенные изменения значений характеристики Эйлера. Достоверность экспоненциальной аппроксимации этих временных рядов варьировалась от 0,63 до 0,90. Морфологический анализ нормированных по площади выбросов значений SWEA показал, что средняя площадь кластеров, формирующих территорию с положительной аномалией, уменьшилась за 19 лет в 10 раз — примерно с 10 000 до 1000 км². Крупные по площади аномалии, типичные в первые годы XXI в., уступили место группам относительно мелких обособленных зон, характерным особенно после 2015 г. Однако столь значительные изменения в пространственной организации запасов воды в снежном покрове горных территорий Евразии практически никак не отразились на их средних значениях. Отсутствует значимый тренд в средних значениях SWEA для территории исследования на период 2001–2019 гг., коэффициент корреляции Пирсона — 0,02. Стабильность среднего уровня увлажнения территории исследования тем не менее сопровождалась значимыми и достоверными изменениями в локальных зонах. Например, область положительных аномалий SWEA (более 100 мм) для 2019 г. в период 2001–2019 гг. характеризуется достоверным (коэффициент корреляции Пирсона — 0,63) ростом водного эквивалента снежного покрова со скоростью 182 мм/10 лет. Таким образом, изменения в пространственной организации снежного покрова горных территорий Евразии, регистрируемые в последние годы, могут сопровождаться локальным перераспределением снега с изменением многолетних норм увлажнённости холодного периода одних горных территорий за счёт конкуренции с другими.

Ключевые слова: изменения климата, погодная вариативность, снежный покров Евразии, запас снега, аномалии водного эквивалента снега, многолетние тренды, характеристика Эйлера, SWEA FEWS NET

Одобрена к печати: 25.08.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-243-254

Введение

Анализ изменений климата и мониторинг многолетней погодной вариативности представляет большой практический интерес. Краткосрочные погодные вариации метеорологических параметров в любой произвольно выбранной точке значительно превышают масштаб многолетних трендов. Это накладывает серьёзные ограничения на точность параметризации многолетних трендов (Монин, Сонечкин, 2005; Монин, Шишков, 2000). Отметим, что вопрос

о трендах настолько сложен, что даже оценки неопределённости в суждениях экспертов о них оказываются проблемой (Семенов и др., 2019).

Существующая многолетняя феноменология указывает, что наиболее выраженные климатические изменения, по-видимому, связаны не столько с изменениями средних значений метеорологических характеристик, сколько с увеличением вероятности аномальных погодных явлений. Иными словами, климатические изменения более значимы в характеристиках динамики погодных режимов нежели в средних значениях метеорологических рядов данных (Diffenbaugh et al., 2005, 2017).

Интересным объектом для исследования пространственно-временной вариабельности метеопараметров представляются запасы снега. Так, снежный покров Евразии — важный природный ресурс, влияющий на многие параметры окружающей среды, в том числе: на календарные даты освобождения территории от снега (Лупян и др., 2018; Терехов и др., 2019а; Черенкова, 2019); активность весеннего половодья (Терехов и др., 2016); объёмы стока рек (Титкова, 2019; Терехов, Пак, 2019); влагообеспеченность первой половины года в аспекте сельского хозяйства (Терехов и др., 2020а; Muratova, Terekhov, 2004; Spivak et al., 2012; Sultangazin et al., 2003), естественных растительных покровов (Верхотуров и др., 2018; Терехов и др., 2019б) или параметров крупных водных объектов (Гинзбург, Костяной, 2018; Терехов и др., 2015).

Многолетняя динамика крупномасштабных пространственных особенностей накопления снега в холодный период в горной зоне центра Евразии может рассматриваться как интегральный дескриптор динамических сценариев в погодно-климатической машине Земли, и в частности Северного полушария. В связи с этим целью настоящей работы становится морфологический анализ многолетней (2001–2019) динамики крупномасштабных паттернов в пространственном распределении количества снега, накопленного за холодный период в горных районах Евразии.

Территория исследования

В центре материка Евразия расположен ряд высочайших горных систем, в том числе: Тянь-Шань (7439 м), Памир (7719 м), Каракорум (8614 м), Гиндукуш (7708 м), Кунь-Лунь (7723 м) и Гималаи (8848 м). Границы территории исследования были определены в координатах 26–45°30' с. ш., 62–100° в. д. (рис. 1, см. с. 245). Таким образом, рассматривалась горная территория в центре Евразии с размером примерно 2000×2000 км.

Топографически территорию исследования можно охарактеризовать как совокупность распределённых максимумов — горных хребтов и отдельных массивов — и протяжённых минимумов — горных и межгорных долин и окружающих горные страны равнин. Западный перенос, переносящий влагу с Атлантического океана, совместно с южными вторжениями со стороны Индийского океана обеспечивает в холодный период накопление на этой территории влаги в виде снега. Особенности пространственного распределения снега на территории исследования во многом зависят от способности атмосферных процессов переносить влагу через хребты и обеспечивать осадки на внутренних территориях (Терехов и др., 2020б; Terekhov et al., 2020).

Исходная информация

Для описания параметров снежного покрова Центральной Азии использовались продукты программы Famine Early Warning System Network (FEWS NET) для Центральной Азии, разрабатываемой Геологической службой США (англ. United States Geological Survey — USGS) (<https://earlywarning.usgs.gov/fews>). В этой системе генерируется ряд карт, характеризующих снежный покров, в том числе: Snow Depth, Snow Depth Anomaly, Snow Water Equivalent и Snow Water Equivalent Anomaly (SWEA). В качестве исходной информации в работе использовался продукт SWEA FEWS NET, в частности его вариант, доступный через внутренний

картографический инструмент Early Warning eXplorer (EWX). Продукт представляет собой обзорные карты с ежесуточным обновлением, архивом с 2000 г. с пространственным разрешением 1 км и покрытием в пределах 21–56° с. ш. и 30–100° в. д.

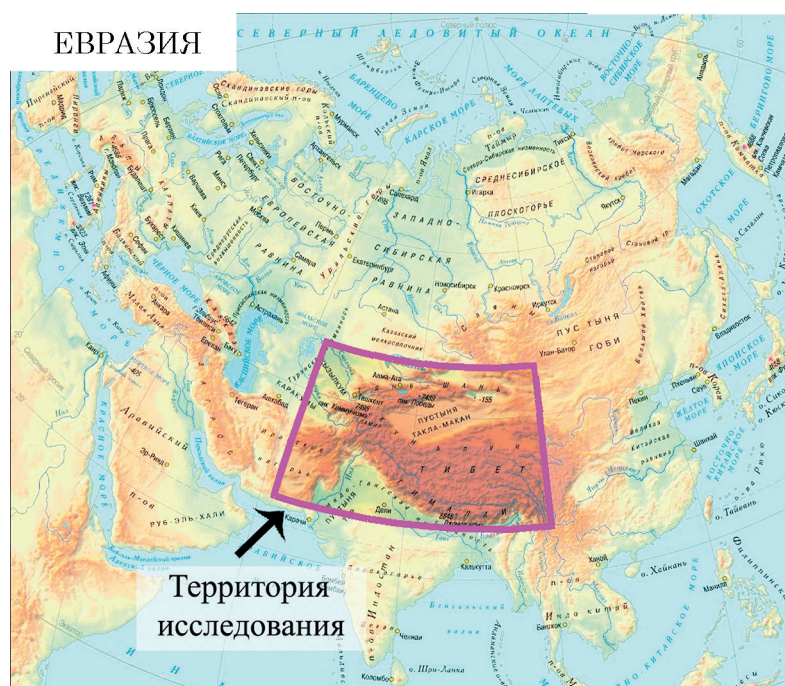


Рис. 1. Территория исследования на физической карте Евразии

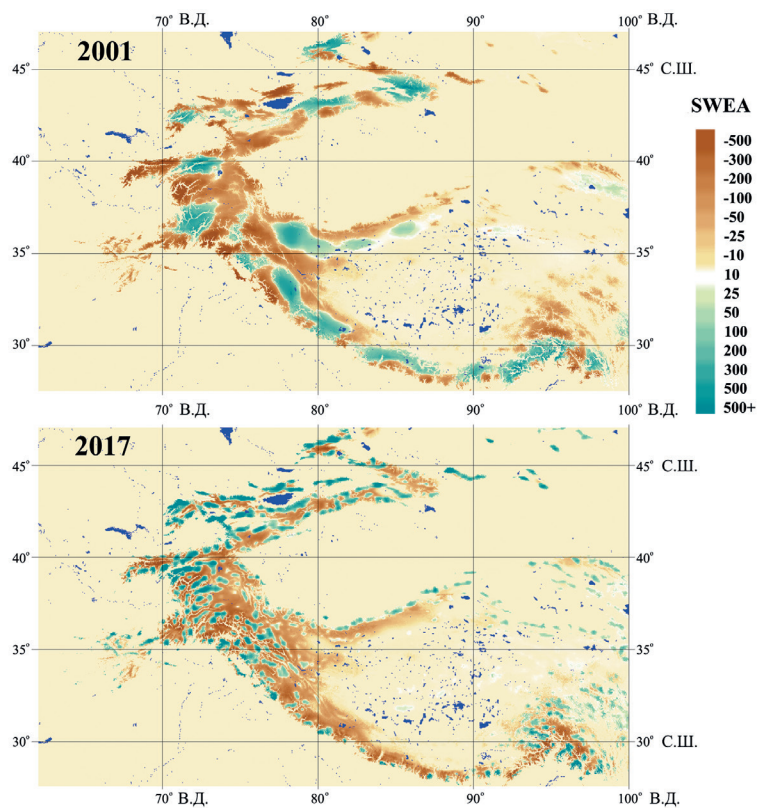


Рис. 2. Примеры карт аномалий запасов воды в снежном покрове на 30 апреля, продукт SWEA FEWS NET

В качестве опорной даты было выбрано 30 апреля. Анализировались 19 карт периода 2001–2019 гг. К этому сроку обширные аридные равнины Центральной Азии, окружающие горные страны, уже освобождаются от снега и снежный покров горных территорий представляет собой систему разномасштабных «островов» среди бесснежных равнин, что удобно для морфологического анализа (рис. 2, см. с. 245).

Элементы морфологического анализа

В этом разделе содержатся краткие сведения о методах морфологического анализа случайных полей (Adler, 1981; Worsley, 1996). Пусть $\Omega(\mathbf{x}) \in R^2$ — некоторая ограниченная открытая область цифрового изображения. Под точкой \mathbf{x} мы будем понимать либо сам пиксель $\mathbf{x} = (i, j)$, $\{i, j\} \in Z \times Z$, либо координаты его центра $(i, j) \rightarrow (x_1, x_2)$ в декартовой локальной системе координат. Цифровой функцией называют отображение $B_\Omega(\mathbf{x}) : \Omega \rightarrow R$. Примером такой функции может служить фотометрическая мера изображения (яркость или контраст), принимающая дискретные значения, например $N = \{0, 1, 2, \dots, 255\}$. Её простейший вариант — бинарное изображение $B_\Omega(\mathbf{x}) \in \{0, 1\}$. В общем случае рассмотрим $B_\Omega(\mathbf{x}) \in I$, где $I \in R^+$ — некоторый интервал положительной вещественной полуоси. Для такой функции возьмём множество выбросов вверх $A_u = \{\mathbf{x} | B_\Omega(\mathbf{x}) \geq u\}$, $u \in I$ поля, образованное теми пикселями $\mathbf{x} \in \Omega$, в которых фотометрическая мера $B_\Omega(\mathbf{x})$ превышает заданный уровень u .

Представим себе плоскость, параллельную координатной (x_1, x_2) . При движении снизу вверх по нормали она пересекает поверхность $B_\Omega(x_1, x_2)$ на разной высоте u . Маркируем пиксели, выступающие выше плоскости, чёрным цветом. Множество таких пикселей образуют множество A_u . Этот приём позволяет сопоставить каждому цифровому изображению ряд чёрно-белых изображений — по одному для каждого уровня. Рассмотрим, что можно вообще измерить на таком множестве (Michielsen, De Raedt, 2001).

Для любого непустого множества выбросов, представленного одной связной областью A , содержащей пиксели одного цвета, введём индикаторную функцию:

- $\chi(A) = 1, \chi(\emptyset) = 0$;
- $\chi(A_1 \cup A_2) = \chi(A_1) + \chi(A_2) - \chi(A_1 \cap A_2)$ для пары областей A_1, A_2 .

Здесь символы \cup, \cap означают объединение (сумму) и пересечение (общую часть) двух множеств. Эти два условия позволяют однозначно определить функционал (χ), который называют характеристикой Эйлера. Она является топологическим инвариантом, т. е. не зависит от формы кластеров. Кроме того, (χ) обладает морфологическими свойствами: этот функционал аддитивен, инвариантен относительно группы твердотельных движений на плоскости и непрерывен в метрике Хаусдорфа. Известно множество разных алгоритмов для вычисления характеристики Эйлера бинарных изображений с разным типом связности пикселей и её применений в различных прикладных задачах (см., например, работы (Karimova, Makarenko, 2003; Makarenko et al., 2001; Richardson, Werman, 2014)). Эвристически целочисленная характеристика Эйлера описывает «пятнистость» множества выброса за некоторый уровень как число компонент связности раздельных кластеров-«островов» за вычетом дыр (лакун) в них.

Схема анализа

Выбросы поля SWEA вверх за выбранный уровень имеют разномасштабную морфологическую структуру. На мелком масштабе основной вклад дают особенности рельефа, горные долины и предгорья (рис. 3, см. с. 247). Целью исследования представляется анализ крупномасштабных морфологических особенностей в аномалиях запаса воды в снежном покрове горных территорий Евразии. Поэтому мелкомасштабные особенности были удалены предварительным морфологическим фильтрованием. Фильтр включал две стадии: дилатацию, т. е. расширение границ кластеров, что приводит к исчезновению внутренних структур и округлению внешних границ, и последующую эрозию границ кластеров на расстояние, несколько превышающее предварительную дилатацию. В результате отдельные маленькие кластеры-«острова» и внутренняя структура крупных кластеров удаляются (см. рис. 3).

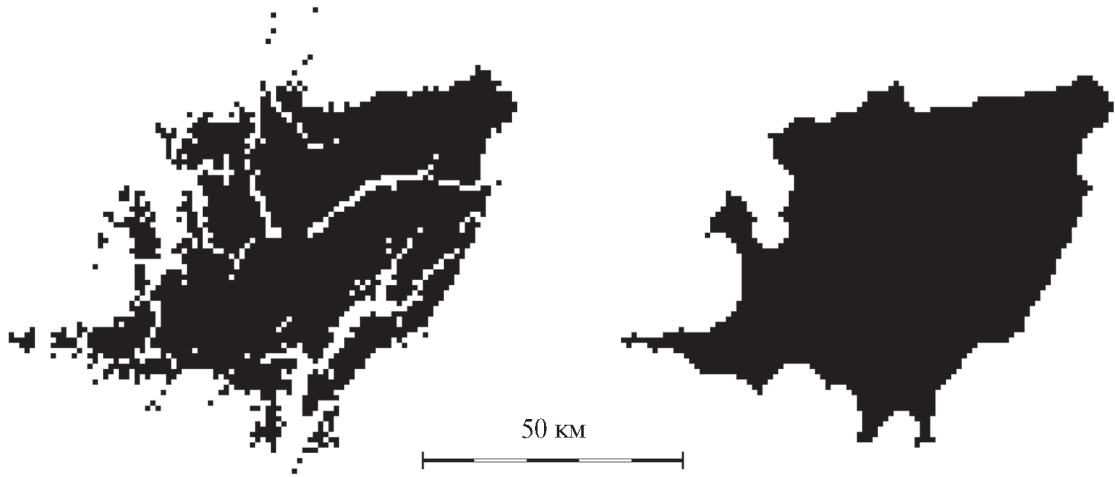


Рис. 3. Пример морфологической фильтрации кластера выброса SWEA выше выбранного уровня для удаления влияния рельефных особенностей (предгорья, ущелья)

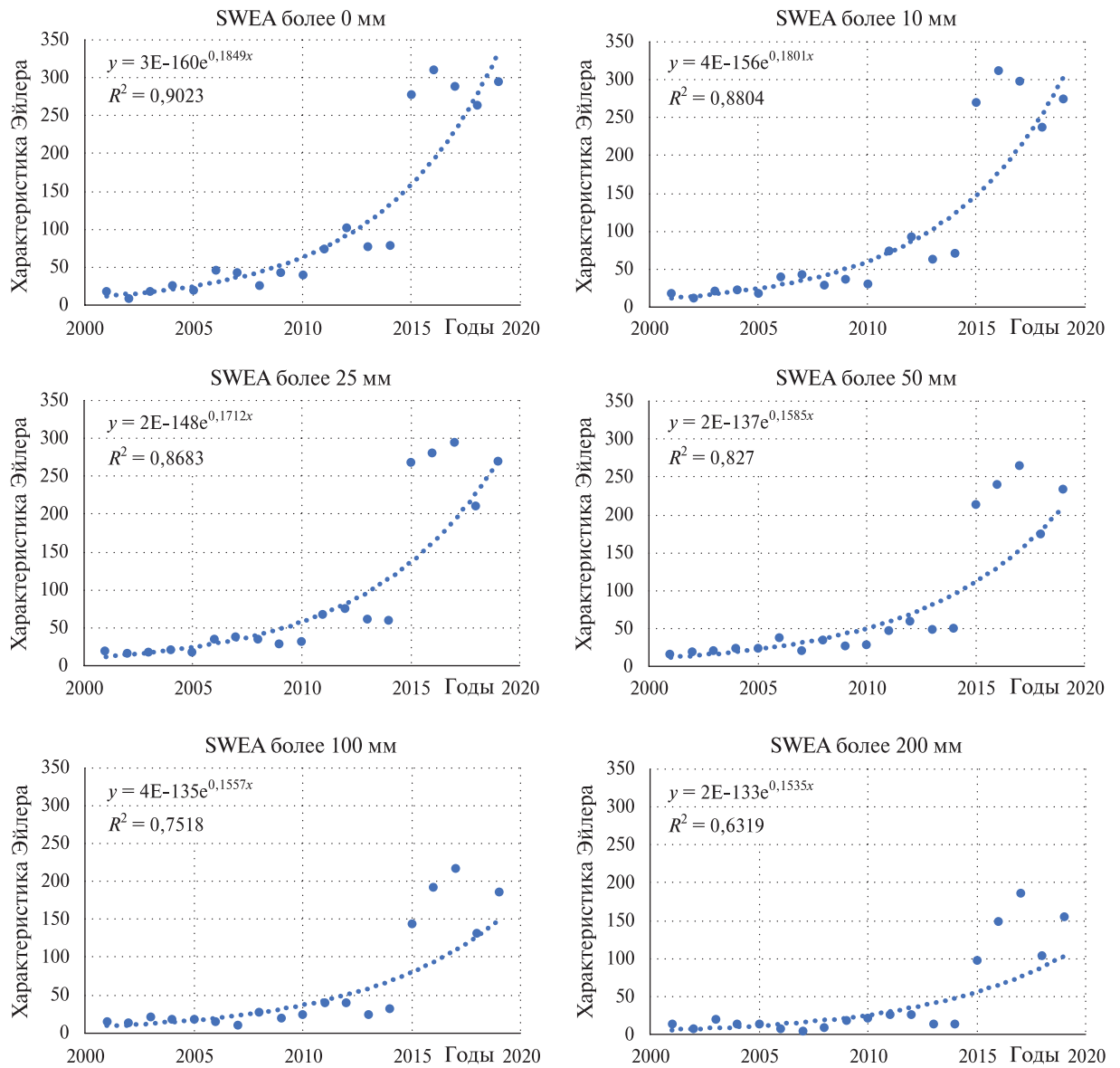


Рис. 4. Динамика величин характеристики Эйлера для выбросов значений SWEA выше уровня (0 мм, 10, 25, 50, 100, 200 мм). Построено по картам SWEA FEWS NET на 30 апреля 2001–2019 гг.

Было проанализировано 19 карт SWEA FEWS NET за 30 апреля с 2001 по 2019 г. Примеры двух карт, иллюстрирующие морфологическую вариативность в пространственной структуре SWEA, представлены на *рис. 2*. Для параметризации морфологии поля SWEA использовались шесть его уровней: 0 мм, 10, 25, 50, 100, 200 мм (H₂O). В сухой малоснежный год площадь выбросов с положительными значениями SWEA меньше, в многоснежный — больше. Топология зон аномалий водного эквивалента, помимо прочих причин, зависит от их суммарной площади. Чем больше площадь аномалий, тем выше вероятность слияния отдельных кластеров и формирования консолидированных крупных зон. С целью учёта влияния снежности сезона для каждого года были выбраны различные уровни SWEA, так чтобы формировались фиксированные по суммарной площади выбросы, для которых также рассчитывались значения характеристики Эйлера (*рис. 4*, см. с. 247).

Для понимания характера динамики погодной вариативности в средних значениях SWEA были рассчитаны соответствующие временные ряды (2001–2019) для всей территории исследования, а также для одной локальной зоны — зоны положительных аномалий (более 100 мм) — на 30 апреля 2019 г. (см. *рис. 6б*).

Результаты

На *рис. 4* приведён набор временных рядов значений характеристики Эйлера для выбросов SWEA выше шести выбранных уровней за период 2001–2019 гг. Достоверность экспоненциальной аппроксимации этих временных рядов варьировалась от 0,90 (уровень выше 0 мм) до 0,63 (для уровня выше 200 мм) (см. *рис. 4*). Консолидированность выбросов вверх значений SWEA с фиксированной суммарной площадью в 150 тыс. км² в период 2001–2019 гг. существенно изменялась (*рис. 5*). Средний размер отдельного кластера за последние 19 лет уменьшился почти в десять раз — с 10 тыс. до 1 тыс. км². Временные ряды средних значений SWEA на 30 апреля 2001–2019 гг. для всей территории исследования и локальной зоны положительных аномалий 2019 г. (более 100 мм) представлены на *рис. 5*.

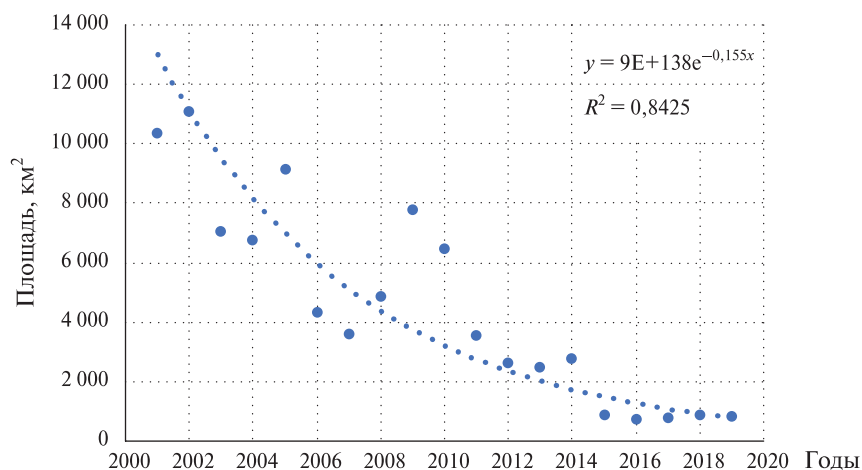


Рис. 5. Средняя площадь отдельного кластера в выбросе вверх значений SWEA с фиксированной суммарной площадью в 150 тыс. км²

Обсуждение

В период с 2001 по 2019 г. морфология пространственно-временной когерентности аномалий водного эквивалента снежного покрова горных территорий Евразии значительно изменилась. Топологические параметры поля SWEA FEWS NET на 30 апреля, описываемые характеристикой Эйлера, изменялись по экспоненциальному закону. Причём достоверность аппроксимации в рамках выбранной математической модели для различных уровней SWEA была весь-

ма высока — до 0,90. При этом средние характеристики водности снежного покрова (среднее значение SWEA) для всей территории исследования оставались практически неизменными со слабо выраженной незначимой тенденцией на небольшое снижение увлажнённости (рис. 6а).

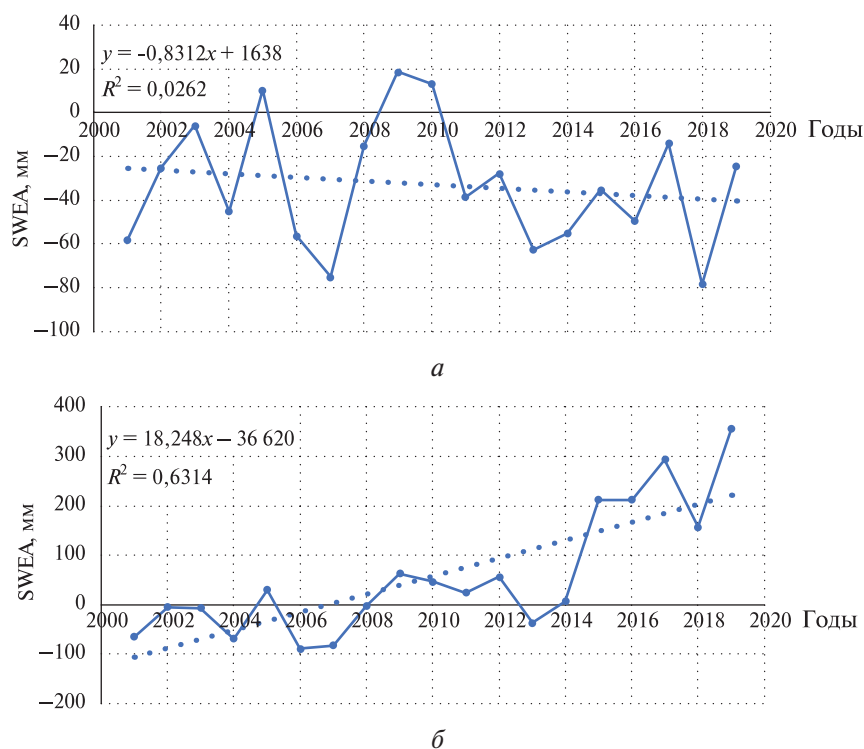


Рис. 6. Динамика средних запасов воды в снежном покрове в период 2001–2019 гг. по данным SWEA FEWS NET на 30 апреля: а — исследуемая территория в целом; б — зона локальных аномалий (SWEA свыше 100 мм) 2019 г.

Интересно отметить, что временной ряд (2001–2019) средних значений SWEA для локальной территории, образованной положительными аномалиями водного эквивалента снежного покрова на 30 апреля 2019 г. (более 100 мм), имел, в противоположность всей территории, значимый тренд на рост увлажнённости со скоростью 182 мм/10 лет и с достаточно высокой статистической значимостью (коэффициент корреляции Пирсона — 0,63) (рис. 6б). То есть внутри в целом стабильной по уровню увлажнения территории присутствует внутренняя динамика, характеризующаяся серьёзными вариациями и возможностью роста/уменьшения увлажнённости локальных зон. По всей видимости, эти аномалии формируются механизмом конкуренции, перераспределения и формирования избытка в одном месте за счёт других территорий. Такой механизм может объяснить многолетнюю стабильность условий увлажнения территории исследования в целом.

Консолидированность аномалий водного эквивалента снежного покрова горных территорий Евразии на 30 апреля за последние 19 лет значительно уменьшилась. Одной из причин, способствующих такому эффекту, может быть перенос акцентов выпадения осадков выше по склону. Чем выше высота территории над уровнем моря, тем меньше её консолидированность. В крайних случаях на уровне моря мы имеем односвязную область, при большой высоте над уровнем моря территория распадается на совокупность массивов вершин. Другая причина заключена в изменениях атмосферного переноса влаги над горными территориями Евразии, где существует сложная система взаимодействия переносящих влагу воздушных масс с передовыми и внутренними хребтами (Терехов и др., 2019б; Terekhov et al., 2020). В настоящем исследовании это наиболее чётко иллюстрируется значимым трендом роста количеств осадков в локальных местах на фоне стабильности увлажнения территории в целом (см. рис. 6).

Заключение

Морфологический анализ снежных покровов горных территорий Евразии на 30 апреля показал, что многолетняя (2001–2019) вариативность погодных условий, в частности аномалий водного эквивалента снежного покрова, имела значимую динамику в пространственно-временной коррелированности. При этом средняя увлажнённость всей высокогорной зоны Евразии в течение 2001–2019 гг. в целом оставалась стабильной. Морфологические изменения заключались в значительном уменьшении консолидированности областей положительных аномалий водного эквивалента снежного покрова. Крупные по площади аномалии с размером около 10 тыс. км², типичные в первые годы XXI в., уступили место группам относительно мелких аномальных зон с площадью каждой менее 1 тыс. км², характерных после 2015 г. По всей видимости, такие многолетние трансформации режима снежности способны изменить многолетние нормы зимней увлажнённости отдельных зон горных территорий Евразии и увеличить средние многолетние нормы увлажнения одних хребтов и горных массивов за счёт уменьшения в других.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан, проект № AP08957394.

Литература

1. *Верхотуров А. Л., Соколова Г. В., Барталев С. А., Крамарева Л. С.* Исследование лесогидрологических процессов на водосборах рек бассейна Амура по данным спутниковых и гидрометеорологических наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 142–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-142-154.
2. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г.* Тенденции изменений гидрометеорологических параметров Каспийского моря в современный период (1990-е–2017 гг.) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 195–207. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
3. *Лузян Е. А., Бурицев М. А., Крашенинникова Ю. С.* Зона раннего схода снежного покрова в Дмитровском районе Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 277–281. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-277-281.
4. *Монин А. С., Сонечкин Д. М.* Колебания климата по данным наблюдений. М.: Наука, 2005. 192 с.
5. *Монин А. С., Шишков Ю. А.* Климат как проблема физики // Успехи физ. наук. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.
6. *Семенов С. М., Инсаров Г. Э., Мендес К. Л.* Характеристика неопределенностей в оценках Межправительственной группы экспертов по изменению климата // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 1. С. 76–96.
7. *Терехов А. Г., Пак А. А.* Спутниковый прогноз влияния пополнения Капшагайского водохранилища (КНР) на водность трансграничной реки Иле в 2019 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 298–302. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-298-302.
8. *Терехов А. Г., Пак И. Т., Долгих С. А.* Данные Landsat-5, -7, -8 и ЦМР в задаче мониторинга гидрологического режима Капшагайского водохранилища на реке Текес (китайская часть бассейна реки Иле) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 174–182.
9. *Терехов А. Г., Пак И. Т., Долгих С. А.* Спутниковые наблюдения аномального весеннего паводка 2016 года в низовьях реки Аягуз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 273–276. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-273-276.
10. *Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Юничева Н. Р.* (2019а) Аномальный режим снежности 2019 года и многолетние тренды в изменениях высоты снежного покрова Казахстана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 351–355. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-351-355.
11. *Терехов А. Г., Витковская И. С., Абаев Н. Н., Долгих С. А.* (2019б) Многолетние тренды в состоянии растительности хребтов Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау по данным eMODIS NDVI C6 (2002–2019) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 133–142. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-133-142.

12. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Лагутин Е. И. (2020а) Диагностика водообеспеченности сельскохозяйственных культур СУАР КНР в течение 2003–2019 гг. по данным eMODIS NDVI C6 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 128–138. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-128-138.
13. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Витковская И. С., Пак А. А., Егембердиева З. М. (2020б) О связи между состоянием горной растительности Тянь-Шаня и индексами Северо-Атлантической Осцилляции в весенне-летний период следующего года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 143–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-143-149.
14. Туткова Т. Б. Изменение климатических условий формирования зимнего стока в бассейне Верхнего Дона по спутниковым и наземным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 147–157. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-147-157.
15. Черенкова Е. А. Тенденции зимнего увлажнения территории бассейнов Северной Двины и Печоры в XX–начале XXI вв. по наземным и спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 285–292. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-285-292.
16. Adler R. J. *The Geometry of Random Fields*. N. Y.: John Wiley and Sons Ltd., 1981. 292 p.
17. Diffenbaugh N. S., Pal J. S., Trapp R. J., Giorgi F. Fine-scale processes regulate the response of extreme events to global climate change // Proc. National Academy of Sciences. 2005. V. 102. No. 44. P. 15774–15778. DOI: 10.1073/pnas.0506042102.
18. Diffenbaugh N. S., Singh D., Mankin J. S., Horton D. E., Swain D. L., Touma D., Charland A., Liu Y., Haugen M., Tsiang M., Rajaratnam B. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate // Proc. National Academy of Sciences. 2017. V. 114. No. 19. P. 4881–4886. DOI: 10.1073/pnas.1618082114.
19. Karimova L., Makarenko N. Diagnosis of stochastic fields by the mathematical morphology and computational topology methods // Nuclear Instruments Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. V. 502. No. 2–3. P. 802–804.
20. Makarenko N., Karimova L., Terekhov A., Novak M. M. Topological classification of radioactive contamination // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2001. V. 289. Iss. 1–2. P. 278–289. DOI: 10.1016/S0378-4371(00)00365-4.
21. Michielsen K., De Raedt H. Integral-Geometry Morphological Image Analysis // Physics Reports-Review Section of Physics Letters. 2001. V. 47. P. 461–538. DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00106-X.
22. Muratova N., Terekhov A. Estimation of spring crops sowing calendar dates using MODIS in Northern Kazakhstan // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2004. V. 6. P. 4019–4020.
23. Richardson E., Werman M. Efficient classification using the Euler characteristic // Pattern Recognition Letters. 2014. V. 49. P. 99–106. DOI: 10.106/j.patrec.2014.07.001.
24. Spivak L., Vitkovskaya I., Batyrbayeva M., Terekhov A. The experience of land cover change detection by satellite data // Frontiers of Earth Science. 2012. V. 6. Iss. 2. P. 140–146. DOI: 10.1007/s11707-012-0317-z.
25. Sultangazin U., Muratova N., Doraiswamy P., Terekhov A. Estimation of weed infestation in spring crops using MODIS data // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2003. V. 1. P. 392–394.
26. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N. The effect of changing stratification in the atmosphere in central zone of Eurasia according to vegetation data of Tien Shan mountains during 2002–2019 // E3S Web Conf. 2020. V. 149. No. 03004. DOI: 10.1051/e3sconf/202014903004.
27. Worsley K. J. The geometry of random images // Chance. 1996. V. 9. P. 27–40. DOI: 10.1080/09332480.1996.10542483.

Morphological analysis of snow deposit distribution in Eurasian mountain land during 2001–2019

A. G. Terekhov^{1,2}, N. G. Makarenko^{1,3}

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

² *Republican State Enterprise Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan*
E-mail: n_ivkina@mail.ru

³ *Central Astronomical Observatory RAS, Saint Petersburg 196140, Russia*
E-mail: ng-makar@mail.ru

This paper is dedicated to the morphological analysis of the spatio-temporal features of snow deposit in Eurasian mountain land that includes: Jungar Alatau, Tien Shan, Pamir, Karakorum, Hindu Kush, Himalaya and Kun-Lun. Data were provided by the Snow Water Equivalent Anomaly (SWEA) USGS FEWS NET product for April 30, 2001–2019. The descriptor of patterns of seasonal distribution of the snow deposit was the Euler characteristic, which measures the topology of SWEA outliers (as set of territorial clusters) at a given level. For six SWEA levels (0, 10, 25, 50, 100, and 200 mm) for the period from 2001 to 2019, significant variations in the Euler characteristic values were found. Coefficients of determination in exponential regression models varied from 0,63 to 0,90. Morphological analysis of the SWEA values normalized by the area showed that the average area of separate clusters of the positive anomaly decreased by a factor of 10 over 19 years from ~10,000 km² to ~1,000 km². Large area anomalies typical of the beginning of the 21st century became groups of relatively small, isolated zones (clusters), especially specific after 2015. Such significant changes in the SWEA spatial patterns practically did not affect their mean values, Pearson correlation coefficient was 0,02. However, the stability of the average level of moisture of the studied mountain territories was accompanied by significant local changes. For example, the zone of positive SWEA anomalies (more 100 mm) for 2019 in the period 2001–2019 was characterized by an increase in average SWEA at a rate of 182 mm per 10 years with Pearson correlation coefficient of 0.63. Thus, the dynamics of the spatial snow regime of the Eurasian mountain land in the past 19 years was accompanied by a local redistribution of snow, with a change in the long-term norms of snow deposit of the cold period of some mountain zones by competition with the others.

Keywords: climate change, weather variability, Eurasian snow cover, snow deposit, snow water equivalent anomaly, trends over years, Euler characteristic, SWEA FEWS NET

Accepted: 25.08.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-243-254

References

1. Verkhoturov A. L., Sokolova G. V., Bartalev S. A., Kramareva L. S., Issledovanie lesogidrologicheskikh protsessov na vodosborakh rek basseina Amura po dannym sputnikovykh i gidrometeorologicheskikh nablyudenii (Investigation of forest hydrological processes in watersheds of the Amur River basin according to satellite and hydrometeorological observations), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 142–154, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-142-154.
2. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Tendentsii izmenenii gidrometeorologicheskikh parametrov Kaspiskogo morya v sovremennyi period (1990-e – 2017 gg.) (Tendencies of changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea in the modern period (1990s – 2017)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 195–207, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-195-207.
3. Loupian E. A., Burtsev M. A., Krashennnikova Yu. S., Zona rannego skhoda snezhnogo pokrova v Dmitrovskom raione Moskovskoi oblasti (Snow cover early melting zone in Dmitrov District of the Moscow Region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 277–281, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-277-281.
4. Monin A. S., Sonechkin D. M., *Kolebaniya klimata po dannym nablyudenii* (Climate fluctuations based on observational data), Moscow: Nauka, 2005, 192 p.

5. Monin A. S., Shishkov Yu. A., *Klimat kak problema fiziki (Climate as problem of physics)*, *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2000, Vol. 170, No. 4, pp. 419–445.
6. Semenov S. M., Insarov G. E., Mendez K. L., *Kharakteristika neopredelennosti v otsenkakh Mezhpriavitel'svennoi gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata (Characterization of uncertainties in assessments of the intergovernmental panel on climate change)*, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2019, Vol. 1, pp. 76–96, DOI: 10.21513/2410-8758-2019-1-76-96.
7. Terekhov A. G., Pak A. A., *Sputnikovyi prognoz vliyaniya popolneniya Kapshagaiskogo vodokhranilishcha (KNR) na vodnost' transgranichnoi reki Ile v 2019 godu (Influence of the Kapshagay reservoir (China) refill on transboundary River Ile runoff and satellite-based forecasting)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 298–302, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-298-302.
8. Terekhov A. G., Pak I. T., Dolgikh S. A., *Dannye Landsat-5, -7, -8 i TsMR v zadache monitoringa gidrologicheskogo rezhima Kapshagaiskogo vodokhranilishcha na reke Tekes (kitaiskaya chast' basseina reki Ile) (Hydrology monitoring of Kapshagay Reservoir on River Tekes (China's part of Ile basin River) based on Landsat-5, -7, -8 data and DEM bathymetry)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 174–182.
9. Terekhov A. G., Pak I. T., Dolgikh S. A., *Sputnikovye nablyudeniya anomal'nogo vesennego pavodka 2016 goda v nizov'yakh reki Ayaguz (Satellite observations of the anomalous spring flood at the lower reach of the Ayaguz River in 2016)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 273–276, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-273-276.
10. Terekhov A. G., Abayev N. N., Yunicheva N. R. (2019a), *Anomal'nyi rezhim snezhnosti 2019 goda i mnogoletnie trendy v izmeneniyakh vysoty snezhnogo pokrova Kazakhstana (Anomalous snowy regime at 2019 year and long-term trends in snow depth in Kazakhstan)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 351–355, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-351-355.
11. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N., Dolgikh S. A. (2019b), *Mноголетние trendy v sostoyanii rastitel'nosti khrebtov Tyan'-Shanya i Dzhungarskogo Alatau po dannym eMODIS NDVI C6 (2002–2019) (Long term trends in vegetation in Tien-Shan and Dzungarian Alatau from eMODIS NDVI C6 data (2002–2019))*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 133–142, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-133-142.
12. Terekhov A. G., Abayev N. N., Lagutin E. I. (2020a), *Diagnostika vodoobespechennosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur SUAR KNR v techenie 2003–2019 gg. po dannym eMODIS NDVI C6 (Remote Sensing of arable land of Xinjiang (China) as an indicator of water availability of agriculture)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 128–138, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-128-138.
13. Terekhov A. G., Abayev N. N., Vitkovskaya I. S., Pak A. A., Yegemberdyeva Z. M. (2020b), *O svyazi mezhdru sostoyaniem gornoi rastitel'nosti Tyan'-Shanya i indeksami Severo-Atlanticheskoi Ostsillyatsii v vesenne-letnii period sleduyushchego goda (Links between the vegetation state over Tien-Shan mountains and North Atlantic Oscillation indices of the upcoming season)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 2, pp. 143–149, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-143-149.
14. Titkova T. B., *Izmenenie klimaticheskikh uslovii formirovaniya zimnego stoka v basseine Verkhnego Dona po sputnikovym i nazemnym dannym (Change in climatic conditions of winter runoff formation in the Upper Don basin revealed by satellite and ground data)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 147–157, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-147-157.
15. Cherenkova E. A., *Tendentsii zimnego uvlazhneniya territorii basseinov Severnoi Dviny i Pechory v XX–nachale XXI vv. po nazemnym i sputnikovym dannym (Trends of winter humidification of the Northern Dvina and Pechora basins in the 20th – early 21st centuries based on terrestrial and satellite data)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 285–292, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-285-292.
16. Adler R. J., *The Geometry of Random Fields*, New York: John Wiley and Sons Ltd., 1981, 292 p.
17. Diffenbaugh N. S., Pal J. S., Trapp R. J., Giorgi F., *Fine-scale processes regulate the response of extreme events to global climate change*, *Proc. National Academy of Sciences*, 2005, Vol. 102, No. 44, pp. 15774–15778, DOI: 10.1073/pnas.0506042102.
18. Diffenbaugh N. S., Singh D., Mankin J. S., Horton D. E., Swain D. L., Touma D., Charland A., Liu Y., Haugen M., Tsiang M., Rajaratnam B., *Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate*, *Proc. National Academy of Sciences*, 2017, Vol. 114, No. 19, pp. 4881–4886, DOI: 10.1073/pnas.1618082114.
19. Karimova L., Makarenko N., *Diagnosis of stochastic fields by the mathematical morphology and computational topology methods*, *Nuclear Instruments Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, Vol. 502, No. 2–3, pp. 802–804.

20. Makarenko N., Karimova L., Terekhov A., Novak M. M., Topological classification of radioactive contamination, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2001, Vol. 289, Issues 1–2, pp. 278–289, DOI: 10.1016/S0378-4371(00)00365-4.
21. Michielsen K., De Raedt H., Integral-Geometry Morphological Image Analysis, *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 2001, Vol. 47, pp. 461–538, DOI: 10.1016/S0370-1573(00)00106-X.
22. Muratova N., Terekhov A., Estimation of spring crops sowing calendar dates using MODIS in Northern Kazakhstan, *Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2004, Vol. 6, pp. 4019–4020.
23. Richardson E., Werman M., Efficient classification using the Euler characteristic, *Pattern Recognition Letters*, 2014, Vol. 49, pp. 99–106, DOI: 10.106/j.patrec.2014.07.001.
24. Spivak L., Vitkovskaya I., Bатыrbайева M., Terekhov A., The experience of land cover change detection by satellite data, *Frontiers of Earth Science*, 2012, Vol. 6, Issue 2, pp. 140–146, DOI: 10.1007/s11707-012-0317-z.
25. Sultangazin U., Muratova N., Doraiswamy P., Terekhov A., Estimation of weed infestation in spring crops using MODIS data, *Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2003, Vol. 1, pp. 392–394.
26. Terekhov A. G., Vitkovskaya I. S., Abayev N. N., The effect of changing stratification in the atmosphere in central zone of Eurasia according to vegetation data of Tien Shan mountains during 2002–2019, *E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 149, No. 03004, DOI: 10.1051/e3sconf/202014903004.
27. Worsley K. J., The geometry of random images, *Chance*, 1996, Vol. 9, pp. 27–40, DOI: 10.1080/09332480.1996.10542483.