

Изменения снежного покрова сухих степей и полупустынь Казахстана на примере бассейна реки Эмбы

А. Г. Терехов^{1,2}, Н. И. Ивкина², Н. Р. Юничева¹, И. С. Витковская¹, А. Г. Елтай³

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: n_ivkina@mail.ru*

³ *Казахский национальный университет имени аль-Фараби
Алматы, 050040, Казахстан
E-mail: yeltay_aizat@mail.ru*

Суточный продукт Snow Depth (USGS/EROS FEWS NET) за период с 1 января по 30 апреля для сезонов 2001–2019 гг. использовался для анализа режима снежности верхней части бассейна р. Эмбы. Бассейн Эмбы расположен в Казахстане на восточном побережье Каспийского моря в малонаселённой сухостепной и полупустынной зоне с полуаридным-аридным, резко континентальным климатом. Для этой территории фактор антропогенного влияния минимален, что позволяет регистрировать направленность естественных многолетних тенденций в режимах снежности. В работе рассмотрены тенденции последних 19 лет для трёх параметров снежного покрова: сезонного максимума и сезонного среднего высоты снега, а также длительности залегания. Показано, что режим снежности бассейна по сезонному максимуму высоты снежного покрова имеет триггерную структуру, включающую два состояния: малоснежный режим (примерно 20 % всей выборки) и режим остальных лет. Тренды изменений последних 19 лет направлены на увеличение высоты снега. Многолетние изменения средней высоты снежного покрова не обнаружены. Регистрируется тренд на уменьшение длительности залегания снежного покрова. Полученные режимы снежности сухостепной и полупустынной зоны восточного побережья Каспийского моря находятся в согласии с Седьмым Национальным сообщением об изменениях климата Казахстана, построенным по метеорологическим данным о температуре воздуха и количестве осадков. Сопоставление продукта Snow Depth с наземной информацией по высоте снега (метеостанция Актобе, WMO ID-35299) показало тесную связь средних многолетних суточных значений. Коэффициент корреляции Пирсона составил 0,963.

Ключевые слова: Центральная Азия, восточное побережье Каспийского моря, река Эмба, дистанционное зондирование, высота снежного покрова, многолетние тренды, Snow Depth FEWS NET

Одобрена к печати: 10.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-101-113

Введение

Применение спутниковых данных в различных прикладных задачах, связанных с мониторингом снежного покрова территорий стран СНГ, довольно широко освещалось в научной литературе (Бураков и др., 2010; Кауазов и др., 2016; Китаев, Титкова, 2010; Китаев и др., 2012, 2017; Пьянков, Шихов, 2016; Телегина и др., 2014; Терехов, 2018; Титкова, 2019). В резко континентальном климате Казахстана твёрдые осадки холодного периода являются критически важным источником воды для различных экономически значимых процессов, в том числе: активности весенних паводков (Терехов и др., 2016); запасов снега в гляциальных зонах формирования стока горных рек и связанной с этим гидроэнергетики (Терехов и др., 2015); увлажнения первой половины вегетационного сезона (Spivak et al., 2012); активности весенних всходов сорной растительности на сельскохозяйственных полях (Sultangazin et al., 2003); календарных дат сева яровых культур (Muratova, Terekhov, 2004) и др.

Основной вопрос применимости спутниковых оценок параметров снежного покрова в практических задачах — это их точность. Например, как показано в работе (Китаев и др., 2017), продукт «Водный эквивалент снега» (Snow Water Equivalent — SWE) от Национального центра данных по исследованию снега и льда США (National Snow and Ice Data Center — NSIDC, <http://nsidc.org/data/NSIDC-0271>) имеет большие, чем было принято считать, расхождения с наземными данными для Северной Евразии и территории России. Это ставит ограничения на применимость данного спутникового продукта к оценке направленности многолетних климатических тенденций. Основные проблемы информативности спутниковых оценок связаны со сложностью обработки микроволнового излучения в задаче оценки влагосодержания снежного покрова (Chang, Rango, 2000; Tait et al., 2000). Существует ряд мешающих факторов, среди которых одним из основных является растительный (лесной) покров. Территория Центральной Азии в основном представлена безлесными сухими равнинами (пустыни, полупустыни, сухие степи, степи, лесостепи). Отсутствие леса упрощает применение спутниковой информации в задачах моделирования параметров снежного покрова. В последнее время появились новые модельные продукты оценки параметров снежного покрытия (Snow Depth, Snow Water Equivalent, Snow Water Equivalent Anomaly), специально разработанные для территории Центральной Азии (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/613>) и опирающиеся на массивы данных систем GDAS (Global Data Assimilation System, <https://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/gdas/>) и LDAS (Land Data Assimilation System, <https://ldas.gsfc.nasa.gov>). Продукт Snow Depth успешно использовался как для оценок снежности территории Казахстана в целом (Терехов и др., 2019), так и при решении локальной задачи прогноза водности некоторых рек Тянь-Шаня снегово-ледникового типа питания (Терехов, Пак, 2019).

Численные характеристики изменений климата и многолетние тенденции в погодных условиях на территории Казахстана освещаются в том числе в рамках специальных работ и обзоров (Seventh..., 2017). Информация базируется на данных наземной измерительной сети метеостанций Республиканского государственного предприятия «Казгидромет». Дополнение этих данных модельными оценками на базе спутниковой информации представляет существенный интерес. С одной стороны, такие исследования могут входить в состав работ по валидации спутниковых продуктов по снежному покрову, например, в рамках рабочей группы Land Product Validation (LPV) CEOS NASA Validation Hierarchy (<https://lpvs.gsfc.nasa.gov>). С другой стороны, появляется возможность расширения списка погодных параметров, для которых представляются климатические тренды на территории Казахстана. Сейчас это температура воздуха и осадки (Seventh..., 2017). Территориально особый интерес представляют малонаселённые, пустынные и полупустынные районы, где сеть метеостанций редка, а сильные ветра в холодное время года (зимние бураны) существенно мешают наземным измерениям количества твёрдых осадков и высоты снега (Guide..., 2018).

Наиболее перспективным представляется использование продукта Snow Depth, регистрирующего высоту снега. Этот параметр достаточно информативен, так как оценивает не факт присутствия/отсутствия снега, а его количество (объём). Кроме того, высота снега регулярно измеряется на метеостанциях, что упрощает процедуру сопоставления полученных результатов с наземной информацией. Переход к водному эквиваленту снега включает различные расчётные процедуры, вносящие дополнительные неточности как для наземного, так и для спутникового продукта (Chang, Rango, 2000; Luoju et al., 2010). В качестве тестового полигона для мониторинга изменения снежности в зонах сухих степей и полупустынь Казахстана лучше использовать бассейны рек. Это не только позволяет иметь данные по снежности территории, но и оставляет возможность характеризовать и получать дополнительную информацию по режимам увлажнения зон формирования стока.

Целью данной работы являлось определение направленности современных тенденций в изменениях режимов снежности зоны сухих степей и полупустынь Казахстана на примере области формирования стока крупнейшей региональной реки восточного побережья Северного Каспия — Эмбы.

Территория мониторинга

Бассейн р. Эмбы полностью расположен на территории Казахстана в зонах сухих степей и полупустынь. Испаряемость в этих климатических зонах (Chen et al., 2010) во много раз превышает небольшое количество годовых осадков (150–250 мм) (Национальный..., 2010), что определяет маловодность региональных рек. Гидрологический режим таких рек относят к отдельному казахстанскому типу (Ресурсы..., 1966). Режим характеризуется высоким недлинным половодьем, летней и зимней меженью, т.е. чисто снеговым питанием.

Эмба берет своё начало на западных склонах гор Мугоджары (южное продолжение Уральских гор). Длина составляет 712 км, площадь водосбора — 40 400 км². Основная приточная сеть сосредоточена в верхней части бассейна реки (Казахская..., 1988). Прямое русло р. Эмбы, идущей от южной оконечности Уральских гор до Каспийского моря, используется географами в качестве границы между Европой и Азией (Lewis, Wigen, 1997). Для тестовой территории была выбрана верхняя часть бассейна реки, выше гидропоста пос. Сага, образующая основную приточную зону с площадью водосбора 23 150 км² (рис. 1).

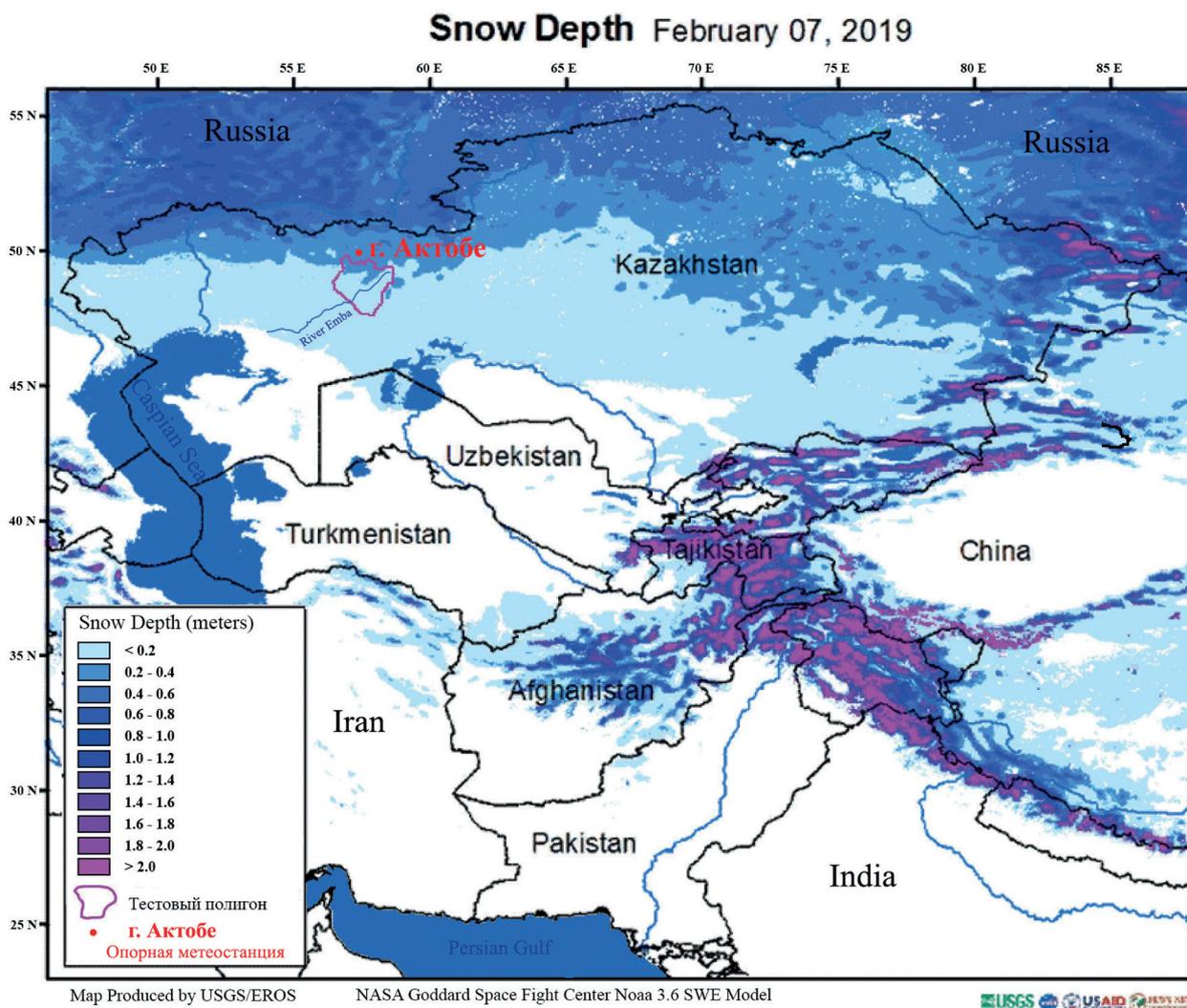


Рис. 1. Пример карты высоты снежного покрова Snow Depth FEWS NET для Центральной Азии с границами тестового полигона и опорной метеорологической станцией (г. Актобе). Исходная карта взята с портала FEWS NET (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/410>)

Исходная информация и методы анализа

В качестве исходной спутниковой информации использовался продукт Snow Depth FEWS NET (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/search/Asia/Central%20Asia>), разработанный в Центре космических полетов имени Годдарда (Goddard Space Flight Center, NASA) и доступный в виде обзорных карт высоты снежного покрова для региона Центральной Азии, определяемого в пределах координат 25–55° с. ш. и 50–85° в. д. Обзорные карты предоставляются в географической проекции (Geographic projection, Lat/Lon) с ежесуточным обновлением и пространственным разрешением 0,044×0,044°, что составляет 4,88×3,14 км для 50° с. ш. (район зоны интереса). Высота снежного покрова является расчётным продуктом в рамках модели Asia-LISS (<https://earlywarning.usgs.gov/fews/product/439>). Карты доступны в виде png-файлов с шагом легенды в 20 см по высоте снежного покрова (см. *рис. 1*).

Модель Asia-LISS оперирует текущими и историческими (11-летний ретроспективный анализ) данными и параметрами из системы GDAS (Global Data Assimilation System, <https://www.ncdc.noaa.gov>). Глубина архива Snow Depth, привязанного к спутниковым данным TERRA MODIS, составляет 20 лет: с октября 2000 г. по настоящий момент. Этот архив позволяет анализировать 19 весенних сезонов (2001–2019) и даёт возможность определять средние многолетние характеристики, а также направленность и параметры трендов многолетних изменений снежности выбранных контуров. Достаточно крупные шаги легенды обзорной карты в высоте снежного покрова приводят к существенному огрублению информации на масштабе отдельных пикселей и небольших по размеру контуров, особенно в случае их расположения в малоснежных регионах. Для уменьшения влияния крупных шагов дискретизации значений Snow Depth в обзорных картах (шаг 20 см) необходимо использовать достаточно крупные контуры, в которых почти всегда присутствуют несколько значений шкалы легенды. В этом случае за счёт усреднения кривые снежности территории теряют значимую связь с выделенными легендой значениями высоты снежного покрова (кратно 20 см).

В работе рассматривалось два контура. Первый — верхняя часть бассейна р. Эмба — состоит из 1424 пикселей. Второй — контур прямоугольной формы вокруг метеостанции Актобе — имеет размер 48×27 пикселей (150×130 км), что составляет 1296 пикселей. Контур тестового полигона, отображающий верхнюю часть бассейна Эмбы (выше пос. Сага) (см. *рис. 1*), строился с помощью экспертного дешифрирования по спутниковым снимкам субметрового разрешения сервиса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth). Дешифровочным признаком являлись следы водной эрозии периодов весеннего снеготаяния.

Методика обработки обзорных карт высоты снежного покрова включала пересчёт исходной цветной RGB-палитры легенды обзорной карты Snow Depth в палитру градаций серого, в которой цвет кодировал высоту снега. Использовались середины значений шкалы легенды. Например, цвет, обозначающий выдел 0–20 см по высоте снега, переобозначался в серый, описываемый RGB-палитрой как 10:10:10; выдел 20–40 см — 30:30:30 и т. д. После такой трансформации всех цветов первоначальной легенды среднее по контуру значение цвета в палитре градаций серого численно принималось за среднюю высоту снега зоны интереса.

Для сопоставления модельной и наземной информации по высоте снежного покрова привлекались данные метеостанции Актобе (WMO ID-35299, http://rp5.kz/Архив_погоды_в_Актобе), которая расположена недалеко от анализируемого бассейна (примерно в 60 км северо-западнее) в областном центре (г. Актобе). Городская инфраструктура ослабляет ветровое поле, поэтому наземные данные по высоте снежного покрова представлялись наиболее корректными для этой зоны.

Период спутникового мониторинга Snow Depth включал 120 дней (с 1 января по 30 апреля) для 19 сезонов (2001–2019). Данный период полностью описывает процесс весеннего снеготаяния и по календарным срокам достаточно хорошо совпадает с сезонными оценками («зима», «весна») направленности климатических изменений в Казахстане по информации Седьмого Национального сообщения (Seventh..., 2017). В качестве анализируемых параметров снежного покрова тестового полигона использовались: максимум высоты снега, средняя высота снега, длительность залегания снежного покрова.

Результаты и их обсуждение

Сформировано и проанализировано 19 сезонных кривых снежности тестовой территории для 2001–2019 гг. (рис. 2). Временной ряд сезонных максимумов высоты снежного покрова (усреднение по контуру) данного периода в целом не имеет выраженного тренда (рис. 3, см. с. 106). Однако выделяется хорошо сформированный кластер низких значений — малоснежные зимы (2004, 2006, 2010, 2018 и 2019 гг.), которые занимают более четверти выборки (5 лет из 19). Средний сезонный максимум высоты снега для малоснежных зим составил $21,2 \pm 2,8$ см, коэффициент вариации — 0,13. Ближайшие к кластеру малоснежных зим значения сезонных максимумов обычных зим равны: 40,1 см (2001); 40,68 см (2003) и 41,05 см (2002). Таким образом, расстояние между средним значением кластера малоснежных зим и ближайшими к нему годами составляет более 6 сигма, что подтверждает значимость выделения малоснежности в отдельный погодный режим. Рассматривая тенденции изменений в величинах сезонных максимумов отдельно для малоснежного режима и для остальных лет, получаем значимый тренд в росте сезонного максимума высоты снежного покрова для обычных лет со скоростью 9,4 см/10 лет, достоверность аппроксимации $R^2 = 0,42$. У малоснежных зим эти параметры равны соответственно 2,5 см/10 лет, $R^2 = 0,38$.

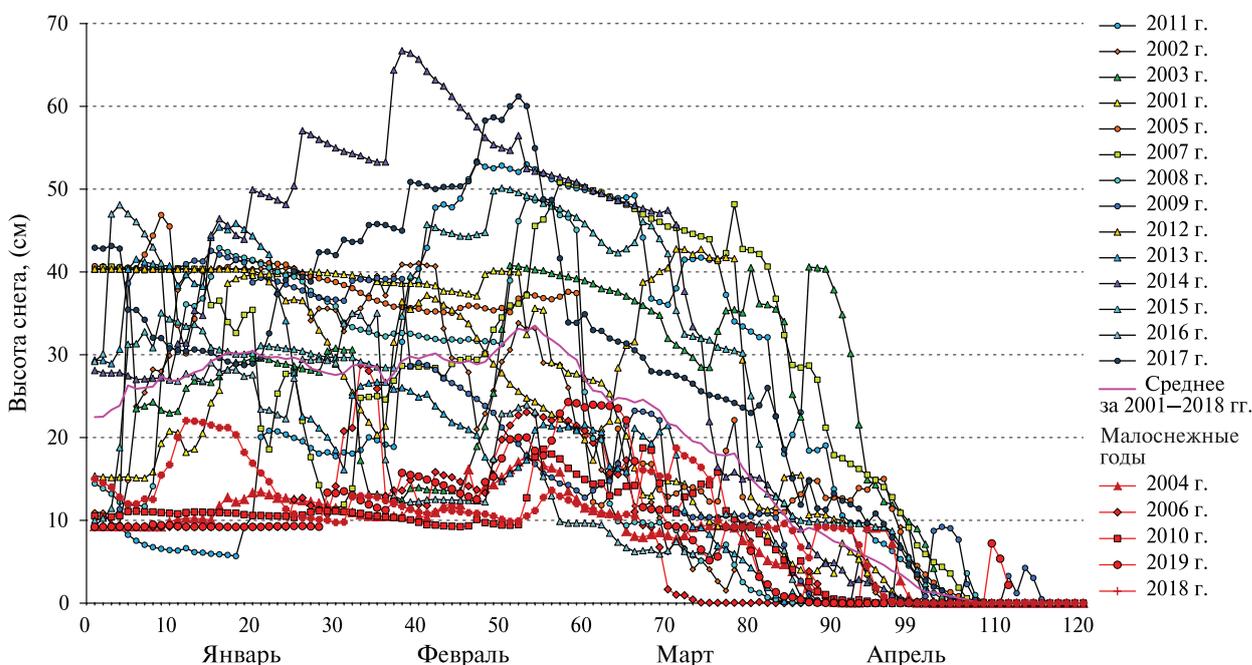


Рис. 2. Кривые снежности северной части бассейна р. Эмбы для сезонов 2001–2019 гг. Построено по данным Snow Depth FEWS NET

Многолетняя (2001–2019) динамика сезонных максимумов высоты снега в зоне формирования стока р. Эмбы, согласно полученным данным, может описываться как «триггерная система». Существует малоснежный режим с характеристиками $21,2 \pm 2,8$ см и долей в выборке более 20 %, а также режим остальных лет со средними характеристиками $48,5 \pm 7,8$ см. Оба режима характеризуются многолетними трендами, направленными на рост величины сезонного максимума высоты снежного покрова, что находится в согласии с информацией Седьмого Национального сообщения по изменению климата в Казахстане об увеличении осадков холодного периода в районе Каспийского моря (Seventh..., 2017). Направленность изменений средних значений высоты снега по тестовому полигону в период 2001–2019 гг. не выражена (рис. 4, см. с. 107). Число дней с отсутствием снежного покрова в тестовом контуре в период 1 января–30 апреля имеет тренд на увеличение со скоростью 2,6 дней/10 лет (см. рис. 4).

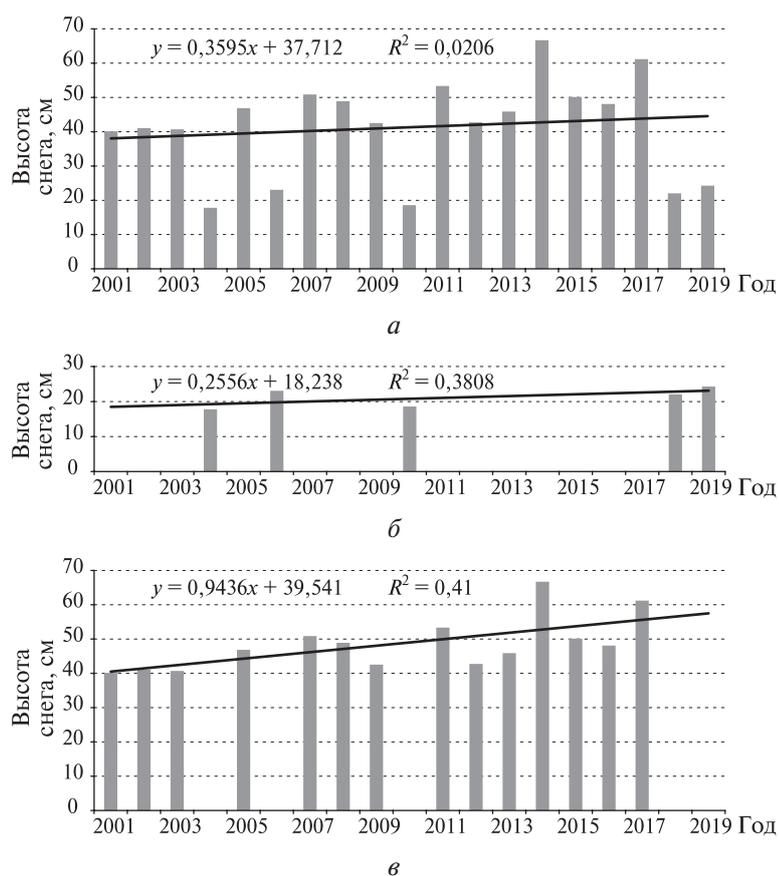


Рис. 3. Сезонные максимумы высоты снежного покрова в тестовом полигоне в период 2001–2019 гг.: а — вся временная выборка; б — малоснежные годы; в — выборка без малоснежных лет. Построено по данным Snow Depth FEWS NET

Таким образом, многолетние изменения в режиме снежности сухостепных и полупустынных зон Западного Казахстана характеризуются увеличением сезонного максимума высоты снега на фоне сокращения времени существования снежного покрова.

Валидация

В настоящий момент отсутствуют длительные и регулярные наземные данные по высоте снежного покрова малонаселённых пустынных территорий Северного Прикаспия в пределах тестового полигона — северной части бассейна р. Эмбы. Кроме того, измерение высоты снежного покрова в условиях сильного ветра весьма затруднено. Положительные и отрицательные формы рельефа значительно отличаются по высоте снега из-за развитого процесса ветрового переноса. На плоских поверхностях ветер формирует специфическую текстуру снежного слоя, похожую на барханы песчаной пустыни, что также затрудняет измерение высоты снега. В связи с этим в качестве наземной опорной информации по высоте снежного покрова были взяты суточные данные с метеостанции Актобе (WMO ID-35229) (см. рис. 1).

Выбор этой метеорологической станции был обусловлен следующими соображениями. Она находится довольно близко к тестовому полигону, примерно в 60 км к северо-западу, в большом городе Актобе, который является центром Актюбинской обл. Казахстана. Вследствие этого персонал на метеостанции гораздо более квалифицированный. Обычно это приводит к более высокому качеству метеорологической информации, чем на станциях, расположенных в удалённой, малонаселённой и полупустынной местности. Кроме того, в городе присутствует больше возможности в организации ветрозащиты. И сам город, его инфраструктура, ослабляет ветровое поле.

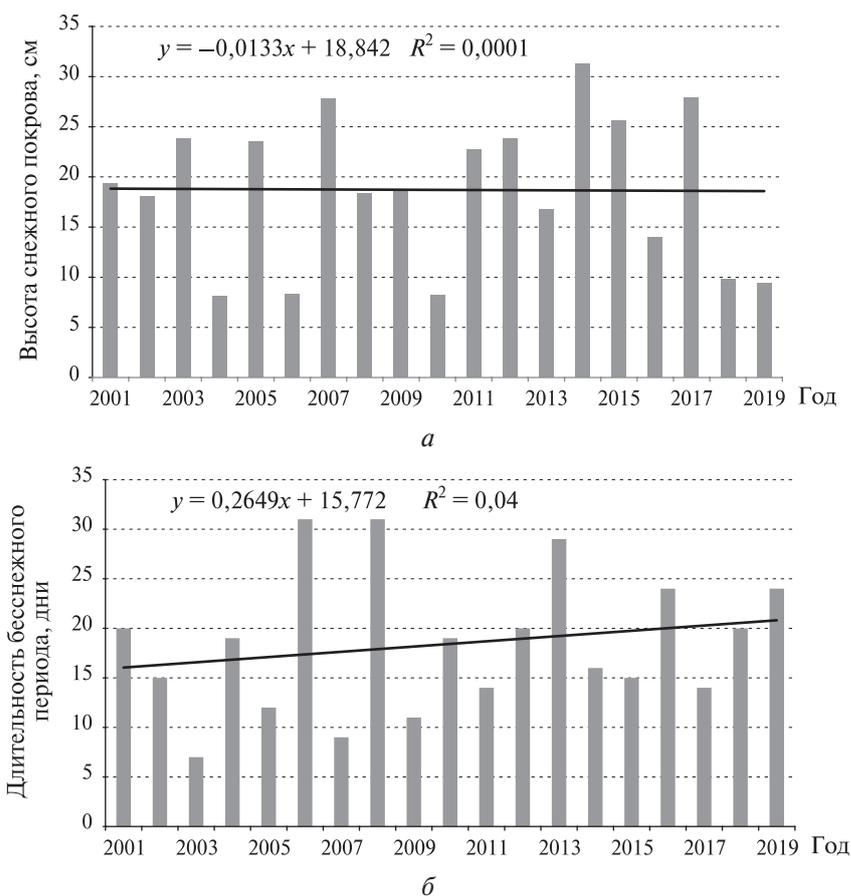


Рис. 4. Показатели тестового полигона в период с 1 января по 30 апреля для сезонов 2001–2019 гг.: а — средняя высота снежного покрова; б — количество дней с отсутствием снежного покрова. Построено по данным Snow Depth FEWS NET

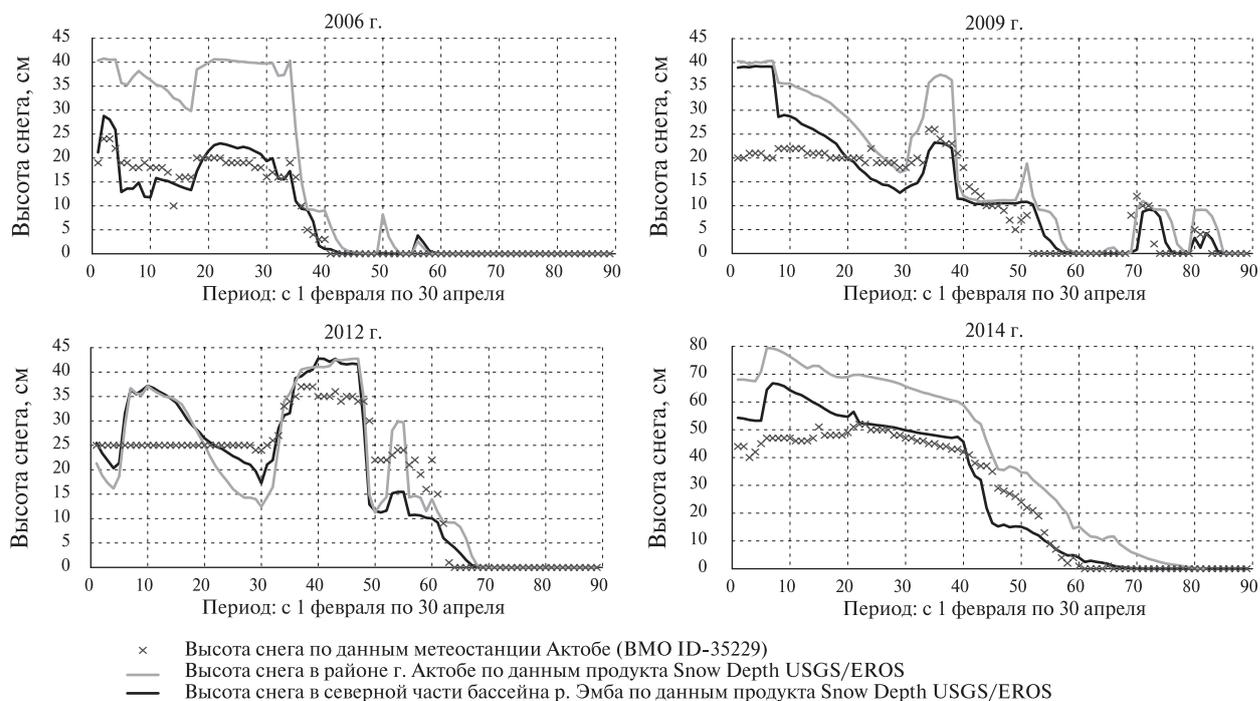


Рис. 5. Сопоставление суточных данных по высоте снежного покрова с метеостанции Актобе (BMO ID-35229) и модельных оценок Snow Depth FEWS NET для зоны вокруг г. Актобе и контура северной части бассейна р. Эмбы для 2006, 2009, 2012 и 2014 гг.

На рис. 5 (см. с. 107) представлено несколько сезонных кривых по высоте снежного покрова для Актобе (наземные данные) в сравнении с модельными оценками (Snow Depth) для окружающей город территории (полигон прямоугольной формы размером 150×130 км) и тестового полигона (северная часть бассейна р. Эмбы). Вид спутниковых кривых очень близок, различия касаются только абсолютных величин высоты снежного покрова. В свою очередь, спутниковые оценки (форма кривых, перегибы на кривой, время сезонного максимума) весьма близки к наземным данным. На рис. 6–7 представлены результаты сопоставления суточных спутниковых оценок высоты снежного покрова в северной части бассейна Эмбы с аналогичными наземными данными, полученными на метеостанции Актобе.

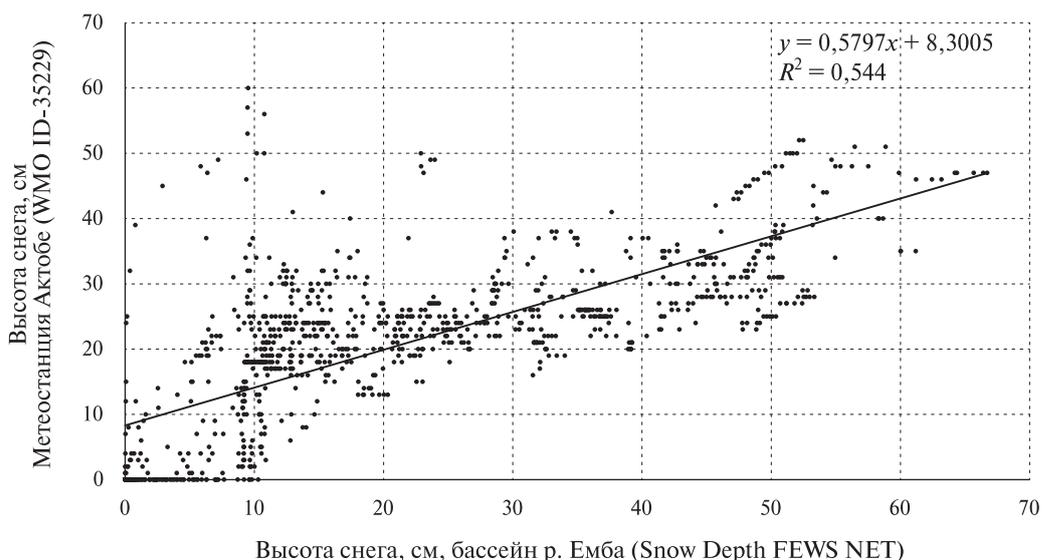


Рис. 6. Сопоставление суточных данных по высоте снега с метеостанции Актобе (WMO ID-35229) и модельных оценок Snow Depth FEWS NET для контура северной части бассейна р. Эмбы за период с 1 февраля по 30 апреля, 2005–2019 гг.

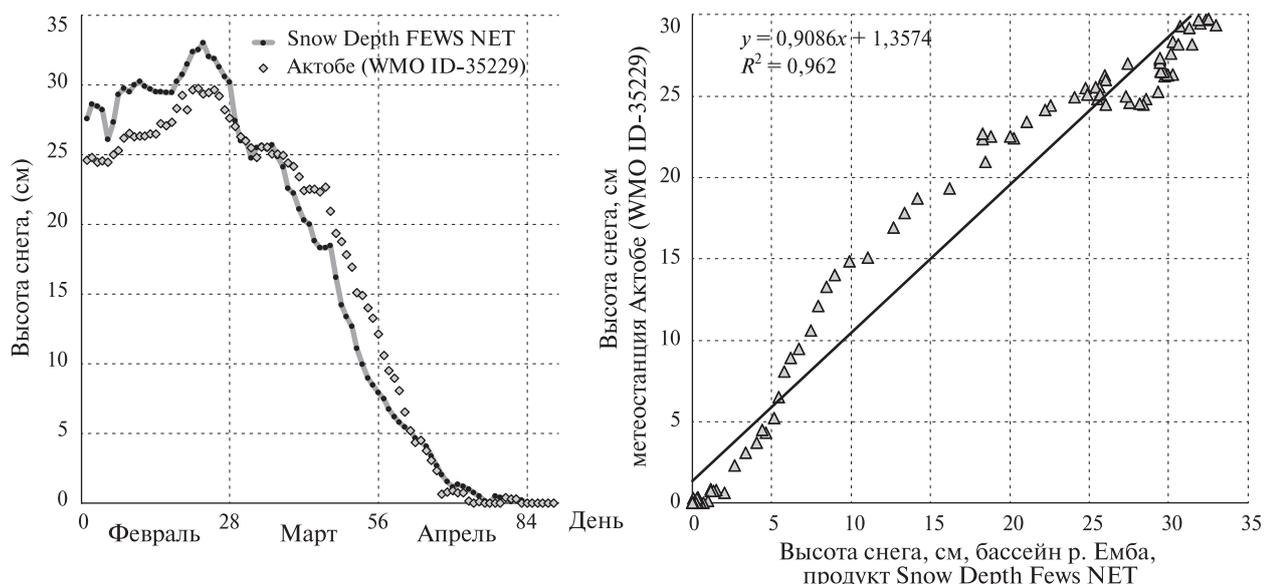


Рис. 7. Сравнение среднего многолетнего (2005–2019) режима снежности периода с 1 февраля по 30 апреля для данных метеостанции Актобе и продукта Snow Depth FEWS NET для контура северной части бассейна р. Эмбы (а). Зависимость между средними многолетними (2005–2019) суточными оценками высоты снега на метеостанции Актобе (WMO ID-35299) и продукта Snow Depth FEWS NET для контура северной части бассейна р. Эмбы. В анализе участвовали данные периода с 1 февраля по 30 апреля

Сравнивая средние многолетние суточные данные (февраль – апрель, 2005–2019) по высоте снежного покрова между метеостанцией Актобе и северной частью бассейна р. Эмбы, можно отметить тесную связь между ними (коэффициент корреляции Пирсона — 0,963). Таким образом, средние многолетние суточные характеристики, описывающие высоту снежного покрова в северной части бассейна Эмбы на базе спутникового продукта USGS/EROS Snow Depth, имеют высокую достоверность, сопоставимую с наземными измерениями.

Выводы

Новый спутниковый продукт Snow Depth FEWS NET с суточным обновлением и архивом с 2000 г. представляется информативным инструментом, с помощью которого можно диагностировать многолетние режимы снежности засушливых зон Центральной Азии. Анализ этих данных позволяет расширить список метеорологических параметров, для которых имеется возможность оценки направленности климатических (многолетних) изменений на территории Казахстана, добавив к ним некоторые параметры снежности территории, в частности высоту снежного покрова и длительность покрытия территории снегом.

Для полупустынной (пустынной) зоны равнин Северного Прикаспия регистрируются тренды на уменьшение длительности существования снежного покрова на фоне увеличения сезонного максимума его высоты. Направленность изменений согласуется с имеющейся метеорологической информацией по увеличению температуры в зимне-весенний период на фоне роста количества осадков (Seventh..., 2017). В режимах снежности пустынных/полупустынных территорий Казахстана значимо выделяется присутствие отдельной моды — мало-снежных зим.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан (проекты AP 05134241 и AP 05135848).

Литература

1. Бураков Д. А., Гордеев И. Н., Ромасько В. Ю. Использование спутниковой информации для оценки динамики снегового покрытия в гидролого-математической модели стока весеннего половодья на примере бассейна Саяно-Шушенской ГЭС // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 113–121.
2. Казахская ССР: краткая энциклопедия. В 4-х т. Т. 2. Природа. 1988. 607 с.
3. Кауазов А. М., Дара А. С., Батырбаева М. Ж., Витковская И. С., Муратова Н. Р., Сальников В. Г., Турулина Г. К., Полякова С. Е., Спивак Л. Ф., Тюребаева С. И. Исследование динамики дат схода снежного покрова в Северном Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 161–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-161-168.
4. Китаев Л. М., Титкова Т. Б. Оценка снеготпасов по данным спутниковой информации // Криосфера Земли. 2010. Т. 14. № 1. С. 76–80.
5. Китаев Л. М., Тихонов В. В., Боярский Д. А., Титкова Т. Б., Комарова Н. Ю. Снежный покров Восточно-Европейской равнины по данным многочастотной микроволновой спутниковой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 249–257.
6. Китаев Л. М., Тихонов В. В., Титкова Т. Б. Точность воспроизведения по спутниковым данным аномальных значений снеготпасов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 27–39. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-27-39.
7. Национальный атлас Республики Казахстан. В 3-х т. Т. 1. Природные условия и ресурсы. Алматы: Казгеодезия, 2010. 150 с.
8. Пьянков С. В., Шихов А. Н. Моделирование пространственного распределения снеготпасов на крупном водосборе с применением спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 29–41. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-29-41.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 12. Нижнее Поволжье и Западный Казахстан. Вып. 2. Урало-Эмбинский район / под ред. З. Г. Марковой. Л.: Гидрометеопиздат, 1966. 152 с.

10. Телегина А. А., Фролова Н. Л., Кутаев Л. М., Туткова Т. Б. Оценка точности спутниковой информации о снегозапасах крупных водосборов европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 38–49.
11. Терехов А. Г. Спутниковый мониторинг формирования снежного покрова Казахстана // Гидрометеорология и экология. 2018. Т. 90. № 3. С. 29–36.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Юничева Н. Р. 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.
16. 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.
17. Chang A., Rango A. Algorithm Theoretical Basis Document for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm. Version 3.1. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 124 p.
18. Chen F., Chen J., Holmes J., Boomer I., Austin P., Gates J., Wang N., Brooks S., Zhang J. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: a review, synthesis and comparison with monsoon region // Quaternary Science Reviews. 2010. V. 29. Iss. 7–8. P. 1055–1068. DOI: 10.1016/j.quascirev.2010.01.005.
19. Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume V — Quality Assurance and Management of Observing Systems. World Meteorological Organization, 2018. WMO-No. 8. 133 p. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9869.
20. Lewis M. W., Wigen K. The Myth of Continents: A Critique of Metageography. University of California Press, 1997. 383 p.
21. Luoju K., Pulliainen J., Takala M., Lemmetyinen J., Derksen C., Wang L. Snow Water Equivalent (SWE) product guide. Version 1.0/01. European space agency study contract report. ESRIN contract 21703/08/I-EC. Global snow monitoring for climate research. 15 Dec. 2010. 15 p.
22. Muratova N., Terekhov A. Estimation of spring crops sowing calendar dates using MODIS in Northern Kazakhstan // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2004. V. 6. P. 4019–4020.
23. Seventh National Communication and Third Biennial Report of the Republic of Kazakhstan to the UN Framework Convention on Climate Change. Astana, 2017. 290 p. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/20963851_Kazakhstan-NC7-BR3-1-ENG_Saulet_Report_12-2017_ENG.pdf.
24. Spivak L., Vitkovskaya I., Batorybayeva 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 // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2003. V. 1. P. 392–394.
26. Tait A. B., Hall D. K., Foster J. L., Armstrong R. L. Utilizing multiple datasets for snow-cover mapping // Remote Sensing of Environment. 2000. No. 72. P. 111–126. DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00099-1.

Snow cover changes of the Kazakhstan dry steppes and semi-deserts: the case of River Emba basin studies

A. G. Terekhov^{1,2}, N. I. Ivkina², N. R. Yunicheva¹, I. S. Vitkovskaya¹, A. G. Yeltay³

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

² RSE Kazhydromet, Almaty 050022, Kazakhstan
E-mail: n_ivkina@mail.ru

³ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan
E-mail: yeltay_aizat@mail.ru

The Snow Depth FEWS NET product with daily update was used to analyze the snow regime of the upper part of the Emba River basin. The observation interval covered the period from January 01 to April 30 for 2001–2019. The Emba River basin is situated in Kazakhstan at the Eastern coast of the Caspian Sea. The area is characterized by a semi-arid to arid and extreme continental climate with dry-steppe and semi-desert landscapes. The population is small and the anthropogenic impact on the snow cover is minimal there. These conditions give an opportunity to identify the natural tendency in long-term changes of snow cover. In this paper, the trends over the last 19 years of the three snow cover characteristics, including the seasonal maximum, seasonal average and snow cover duration are presented. It was shown that the snow conditions for the seasonal maximum are triggered. There are two modes, the first is a low-snow regime (approximately 20 % of the entire sample) and the second mode covers the other years. The trends of the last 19 years show increasing snow depth. Also, there is a tendency of snow cover duration decrease. There is no trend in the seasonal average of the snow depth. The results obtained for snow cover of the dry-steppe and semi-desert zones of Kazakhstan are consistent with data from the 7th National report on climate change in Kazakhstan, which is based on meteorological observation of the air temperature and precipitation. Comparison of the Snow Depth FEWS NET product with snow depth ground data of weather station (Kazakhstan, Aktobe; WMO ID-35299) showed a good agreement of the long-term daily average values with the Pearson correlation coefficient of 0,963.

Keywords: Central Asia, Eastern coast of the Caspian Sea, Emba River, remote sensing, snow depth, multi-year trends, Snow Depth FEWS NET

Accepted: 10.02.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-101-113

References

1. Burakov D. A., Gordeev I. N., Romasko V. J., Ispol'zovanie sputnikovoi informatsii dlya otsenki dinamiki snegovogo pokrytiya v gidrologo-matematicheskoi modeli stoka vesennego polovod'ya na primere basseina Sayano-Shushenskoi GES (Snowed area counting by remotely sensed data as a block of spring high water mathematical model for prediction of water flow to water reservoir of Sajano-Shushenskaya hydroelectric power station), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 2, pp. 113–121.
2. *Kazakhskaya SSR: kratkaya entsiklopediya, v 4 t., T. 2, Priroda* (Kazakh SSR: a brief encyclopedia, in 4 vol., Vol. 2: Nature), 1988, 607 p.
3. Kauazov A. M., Dara A. S., Batyrbayeva M. Zh., Vitkovskaya I. S., Muratova N. R., Salnikov V. G., Turulina G. K., Polyakova S. E., Spivak L. F., Turebayeva S. I., Issledovanie dinamiki dat skhoda snezhnogo pokrova v Severnom Kazakhstane (Investigation of timing dynamics of snow cover loss in Northern Kazakhstan), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 161–168, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-161-168.
4. Kitaev L. M., Titkova T. B., Otsenka snegozapasov po dannym sputnikovoi informatsii (Estimation of snow deposit on base of satellite data), *Kriosfera Zemli*, 2010, Vol. 14, No. 1, pp. 76–80.
5. Kitaev L. M., Tikhonov V. V., Boyarskii D. A., Titkova T. B., Komarova N. Yu., Snezhnyi pokrov Vostochno-Evropeiskoi ravniny po dannym mnogochastotnoi mikrovolnovoi sputnikovoi radiometrii (Snow

- Cover of the East European Plain According to the Multi-Frequency Microwave Satellite Radiometry), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 249–257.
6. Kitaev L. M., Tikhonov V. V., Titkova T. B., Tochnost' vosproizvedeniya po sputnikovym dannym anomal'nykh znachenii snegozapasov (The accuracy of snow water equivalent anomalies retrieval from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 27–39, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-27-39.
 7. *Natsional'nyi atlas Respubliki Kazakhstan, V 3 t., T. 1, Prirodnye usloviya i resursy* (National Atlas of Kazakhstan, Vol. 1: Natural Conditions and Resources), Almaty: Kazgeodeziya, 2010, 150 p.
 8. Pyankov S. V., Shikhov A. N., Modelirovanie prostranstvennogo raspredeleniya snegozapasov na krupnom vodosbore s primeneniem sputnikovoi informatsii (Modeling of the spatial distribution of snow cover on a large catchment area using satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 29–41, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-29-41.
 9. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR: Gidrologicheskaya izuchennost, Nizhnee Povolzh'e i Zapadnyi Kazakhstan, Uralo-Embinskii raion* (Resources of Surface Water of USSR: Hydrology Knowledge, Lower Volga, Ural-Emba Rayon), Z. G. Markovoi (ed.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966, Vol. 12, Issue 2, 152 p.
 10. Telegina A. A., Frolova N. L., Kitaev L. M., Titkova T. B., Otsenka tochnosti sputnikovoi informatsii o snegozapasakh krupnykh vodosborov evropeiskoi territorii Rossii (Estimation of precision of snow storage satellite data for large watersheds of European Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 38–49.
 11. Terekhov A. G., Sputnikovyi monitoring formirovaniya snezhnogo pokrova Kazakhstana (Satellite monitoring of the snow cover formation in Kazakhstan), *Gidrometeorologiya i Ekologiya*, 2018, Issue 90, No. 3, pp. 29–36.
 12. 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.
 13. 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 batymetry), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 174–182.
 14. 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.
 15. Terekhov A. G., Abayev N. N., Yunicheva N. R., Anomal'nyi rezhim snezhnosti 2019 goda i mnogoletnie trendy v izmeneniyakh vysoty snezhnogo pokrova Kazakhstana (Anomalous snow regime in 2019 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.
 16. 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.
 17. Chang A., Rango A., *Algorithm Theoretical Basis Document for the AMSR-E Snow Water Equivalent Algorithm, Version 3.1*, Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2000, 124 p.
 18. Chen F., Chen J., Holmes J., Boomer I., Austin P., Gates J., Wang N., Brooks S., Zhang J., Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: a review, synthesis and comparison with monsoon region, *Quaternary Science Reviews*, 2010, Vol. 29, Issue 7–8, pp. 1055–1068, DOI: 10.1016/j.quascirev.2010.01.005.
 19. *Guide to Instruments and Methods of Observation, Vol. V — Quality Assurance and Management of Observing Systems*, World Meteorological Organization, 2018, WMO-No. 8, 133 p., available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9869.
 20. Lewis M. W., Wigen K., *The Myth of Continents: A Critique of Metageography*, University of California Press, 1997, 383 p.
 21. Luo J. K., Pulliainen J., Takala M., Lemmetyinen J., Derksen C., Wang L., *Snow Water Equivalent (SWE) product guide, Version 1.0/01, ESA study contract report. ESRIN contract 21703/08/I-EC, Global snow monitoring for climate research*, 15 Dec. 2010, 15 p.
 22. Muratova N., Terekhov A., Estimation of spring crops sowing calendar dates using MODIS in Northern Kazakhstan, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2004, Vol. 6, pp. 4019–4020.

23. *Seventh National Communication and Third Biennial Report of the Republic of Kazakhstan to the UN Framework Convention on Climate Change*, Astana, 2017, 290 p., available at: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/20963851_Kazakhstan-NC7-BR3-1-ENG_Saulet_Report_12-2017_ENG.pdf.
24. Spivak L., Vitkovskaya I., Batyrbayeva 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, *Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2003, Vol. 1, pp. 392–394.
26. Tait A. B., Hall D. K., Foster J. L., Armstrong R. L., Utilizing multiple datasets for snow-cover mapping, *Remote Sensing of Environment*, 2000, No. 72, pp. 111–126, DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00099-1.