

Динамика суммы осадков Республики Тыва по наземным и глобальным данным

Х. Б. Куулар, А. Ф. Чульдун

*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН
Кызыл, 667007, Россия
E-mail: k-k-188@list.ru*

Для малоисследованных горных регионов доступны глобальные климатические данные поверхности Земли. Однако их применимость для гор Южной Сибири до сих пор изучена недостаточно. В данной работе мы представили на карте распределение годовых сумм осадков по данным реанализа ERA5-Land Daily (*англ.* European ReAnalysis 5-Land Daily) на территории Республики Тыва, расположенной в центре Азии, и оценили тренд динамики за 62-летний период (1961–2023). Для цифровой модели рельефа поверхности Республики Тыва использованы данные ALOS (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) с разрешением 30 м. В работе дан сравнительный анализ суммы осадков по данным метеостанций и по итогам реанализа ERA-5-Land. Также исследована сумма осадков по пяти высотным уровням. По данным реанализа наибольшая сумма осадков (в среднем от 273 до 458,8 мм) сосредоточена на самом высоком высотном уровне 2200 м над уровнем моря и более. И наименьшая сумма осадков (в среднем 88,5–144,0) — на 500–1000 м над уровнем моря. Полученные результаты приемлемы для горно-котловинных территорий, так как демонстрируют существенную дифференциацию суммы осадков по всем высотным уровням с учётом региональных различий. Глобальные климатические данные становятся ценным источником информации для горных территорий при малых данных или отсутствии метеостанций. Роль результатов реанализа для горных территорий будет возрастать при дальнейшем их совершенствовании в сочетании с данными дистанционного зондирования.

Ключевые слова: тренды годовых сумм осадков, данные метеостанций, данные реанализа, высотные уровни

Одобрена к печати: 15.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-224-232

Введение

Изменения климата проявляются по-разному в различных ландшафтах Земли в зависимости от особенностей географического расположения. Влияние глобального потепления на количество осадков отличается в разных регионах и хорошо описано в научных работах учёных из разных стран, из которых отметим публикации (Второй..., 2014; Газаев и др., 2019; Кислов, Суркова, 2009; Ранькова, Груза, 1998). Атмосферные осадки являются важной компонентой водного баланса различных территорий, оказывая значительное влияние на состояние экосистем. В различных частях Земли наблюдаются изменения суммы осадков в условиях увеличения среднесезонной и годовой температуры. Например, в высоких широтах (Аляска, Канада, Гренландия, Исландия) наблюдается увеличение осадков и продолжительности их выпадения в виде дождя, связанное с ранним наступлением весны (Trenberth et al., 2011). Тенденции усиления осадков также заметны в Восточной и Южной Африке, а также в Китае (Liu et al., 2016). В Белоруссии уровень осадков вырос на 5 % в северной части и на 7 % в Гомельской области (Мельник и др., 2018), в то время как на сухих и засушливых территориях наблюдается снижение влажности и увеличение частоты засух (Южная Евразия, Средиземноморье, Центральная Африка).

По данным из Европейской части России, наблюдается увеличение жидких и смешанных осадков на 5 и 17 % соответственно, а также уменьшение твёрдых осадков на 15 % за период 1976–2010 гг. (Второй..., 2014). В Сибири количество осадков имеет положительный тренд до 20 мм/10 лет (Ломакина, Лавриненко, 2022).

Изменения климата меняют влажность и растительного покрова, что подталкивает к проведению исследований в области увлажнения и его воздействия на растительность (Прожерина, Наквасина, 2022; Tchebakova, Parfenova, 2012). Существует интерес к выявлению связи между увлажнением и растительным покровом (Габбасова и др., 2023), включая изучение изменений в осадках в Центральной Азии на протяжении последних десятилетий (Zhang, 2022).

Особый интерес в связи с изменением климата вызывают горы Южной Сибири (Воропай, Рязанова, 2023). Климат горных территорий существенно отличается от климата равнинных территорий. Из-за изменения климатических условий в горах Южной Сибири ожидается перераспределение основных лесообразующих пород. Прогнозные модели, учитывающие потепление, свидетельствуют о предстоящих преобразованиях площадей растительных зон, в том числе увеличении площадей светлохвойных лесов (*лат. Larix sibirica Ledeb., Pinus sylvestris L.*). В низкогорьях прогнозируется расширение степей и сухих степей (Галахов и др., 2017).

Изучению климата республики посвящено немного работ, в том числе публикация наших коллег (Андрейчик, Чупикова, 2012). Процессы изменения климата в горах Южной Сибири привлекают большое внимание (Анализ..., 2018; Назимова и др., 2023; Парфенова, Чебакова, 2023; Поликарпов и др., 1986). Например, в исследовании (Липка, 2018, с. 51) сообщается: «Современные изменения климата рассматривались как отклонение основных характеристик в 2007–2016 гг. по отношению к 1961–1990 гг. Средняя годовая температура воздуха за это время выросла на 0,8...1,2 °С в различных частях [Алтае-Саянского] региона». Изучение влияния атмосферного увлажнения на растительность и его динамики является актуальной задачей, поскольку увлажнение входит в основные параметры изменяющегося климата.

Цель работы — оценка тренда динамики суммы осадков горно-котловинной территории Республики Тыва по данным метеостанций и реанализа.

Материалы и методы

Климат республики обусловлен сложным горно-котловинным рельефом (508–3966 м н. у. м. (метров над уровнем моря)) и местоположением в переходной зоне между центральноазиатскими пустынями и сибирской тайгой и имеет свои особенности режима выпадения и распределения осадков (Макунина, 2020).

В качестве источников суммы осадков и относительного увлажнения использованы данные Тувинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также информация из открытых источников (Булыгина и др., 2015). Однако из-за недостаточного количества метеорологических станций возникают трудности с получением данных. Одним из вариантов получения климатических данных и отдельных метеоданных является использование результатов реанализа.

Для настоящего исследования данные получены с помощью коллекции ERA5-Land Daily – ECMWF Climate Reanalysis (*англ. European ReAnalysis 5-Land Daily – ECMWF Climate Reanalysis; ECMWF — European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) — коллекция климата, которая представляет собой глобальный ежедневный набор данных с пространственным разрешением ~30 км, содержащая характеристики погоды. При сравнении результатов реанализа с данными метеостанций следует соблюдать осторожность, поскольку наблюдения метеостанций являются локальными для определённой точки пространства и времени, не представляют собой средние значения по модельной сетке и временному шагу модели. В данные реанализа не входят туман, роса и осадки, которые испаряются в атмосфере. Данные платформы GEE (*англ. Google Earth Engine*) имеют формат сетки, который позволяет обеспечить непрерывный пространственный охват территории с ежедневным временным разрешением. Результаты реанализа подготовлены Службой по изменению климата C3S (*англ. Copernicus Climate Change Service*) при ECMWF (Гордов и др., 2011).

В платформе GEE хорошо обрабатывать большие объёмы пространственных данных для применения. В качестве цифровой модели поверхности использована коллекция Copernicus

DEM GLO-30 (англ. Copernicus Global 30 m Digital Elevation Model) — цифровая модель поверхности с пространственным разрешением 30 м. Для анализа данные загружены в GEE, а затем обработаны на языке программирования JavaScript. Построены карты высотных уровней на территории республики: 500–1000, 1001–1300, 1301–1700, 1701–2200, 2201 м н. у. м. и более, итого пять гипсометрических уровней.

Обсуждение и результаты

Климат республики характеризуется как резко континентальный, среднегодовая температура составляет $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя годовая сумма осадков 218,1 мм (по данным гидрометеостанций (ГМС) Республики Тыва 1961–2023 гг.). Большая часть осадков выпадает с июня по август в виде непродолжительных дождей и ливней. На протяжении многих лет можно наблюдать аномалии в сумме годовых осадков, где сочетаются как повышенные, так и пониженные значения осадков. В зависимости от того, увеличивается или уменьшается количество осадков, тренд абсолютного увлажнения меняет своё направление. Но при этом абсолютное увлажнение может не совпадать с относительным увлажнением (с оценкой через гидротермический коэффициент (ГТК)), которое зависит от соотношения тепла и влаги. На рис. 1 представлены аномалии годовых осадков по метеостанциям республики за период с 1961 по 2023 г. с линейным трендом и уравнением, а также 11-летняя скользящая средняя. Заметно, что аномалии среднегодовых осадков за 60-летний период варьировались от $-80,8\text{ мм}$ (1982) до $83,5\text{ мм}$ (1994).

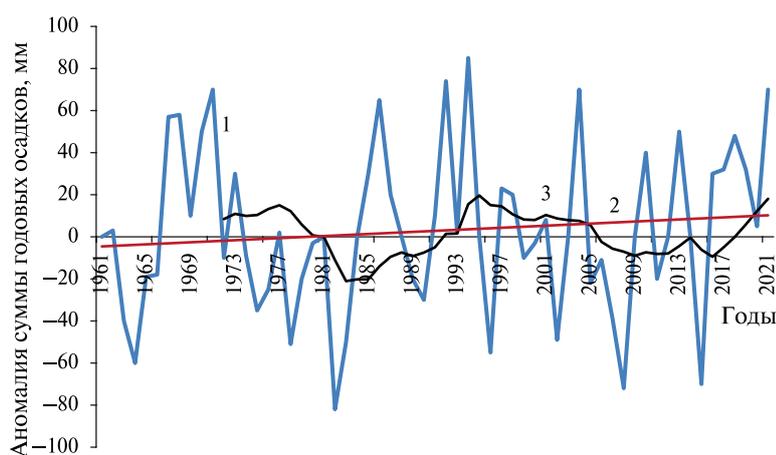


Рис. 1. Динамика аномалии суммы годовых осадков (1) по метеостанциям республики за 1961–2021 гг. с линией тренда (2), а также 11-летняя скользящая средняя (3)

В период с 1961 по 2021 г. заметны изменения в колебаниях годовых осадков, представленных линией тренда. Одиннадцатилетняя скользящая средняя позволяет выделить периоды 1970–1990 и 2004–2017 гг. как годы с пониженным количеством осадков, а 1982–2004 и 2009–2023 гг. — с повышенным. Средняя скорость увеличения количества годовых осадков составила $2,5\text{ мм}/10\text{ лет}$, что можно считать несущественным. Среднегодовые осадки в пределах средней нормы $251,0 \pm 41,1\text{ мм}$ в период 1991–2022 гг. Положительные тренды осадков отмечены в 1982–2004 гг. По данным метеостанций значительный положительный тренд суммы осадков наблюдается в центральной части республики — $0,8\text{ мм}/10\text{ лет}$ (ГМС Кызыл). Значительный отрицательный тренд суммы осадков фиксируется в южной части республики: $-0,63\text{ мм}/10\text{ лет}$ (ГМС Эрзин). Потепление климата сопровождается изменениями суммы осадков для холодного периода года. Сумма осадков зимы (XI–III мес) в последние 30 лет (1990–2023) увеличилась на 20 мм по сравнению с 1961–1990 гг., весны (IV–V мес) — на 3,3 мм. Расчёт суммы осадков лета, выполненный на основе наземных данных, показывает,

что в юго-западной (Мугур-Аксы) и в южной (Эрзин) части республики идёт небольшое снижение осадков, в то время как в восточной (Тоора-Хем) и центральной (Кызыл) наблюдается незначительный рост суммы осадков. Изменение осадков носит колебательный характер, статистически значимого тренда по данным метеостанций не наблюдается.

Повышение среднегодовой суммы осадков относительно значений базового периода произошло в основном за счёт увеличения среднемесячных осадков зимы и весны (ноябрь – май) на 1,28 мм, рост средних осадков осенью (сентябрь – октябрь) в республике выражен слабо. Наибольшее значение скорости роста осадков наблюдается весной, достигая 2,5 мм, при $r^2 = 0,06$.

В таблице приведена оценка линейного тренда аномалии суммы осадков по метеостанциям за 1961–2020 гг. Анализ 60-летнего тренда по метеостанциям показывает его неравномерность: тренд варьируется в зависимости от станций, свидетельствуя о различиях в изменениях осадков по территории республики. Тренды суммы осадков в регионах при изменяющемся климате показывают значительные различия: восточная часть республики (станция Тоора-Хем) испытывает выраженный положительный тренд, в то время как южная часть (станции Эрзин, Мугур-Аксы) — отрицательный.

Таблица. Оценка линейного тренда суммы годовых осадков за 1961–2021 гг.

Метеостанция	Координаты, град		Высота, м н. у. м.	Коэффициент линейного тренда, мм/10 лет
	с. ш.	в. д.		
Эрзин	50,27	90,43	1100	–0,6
Мугур-Аксы	50,37	90,43	1850	–0,2
Сосновка	51,15	94,52	947	0,06
Кызыл	51,72	94,50	626	0,89
Тоора-Хем	52,47	96,10	919	0,08

В последние десятилетия наблюдается быстрый рост температуры, и эти изменения климата отчётливо проявляются на территории республики (Куулар, 2019). Рост температуры воздуха приводит к большему испарению с поверхности Земли. При потеплении влагоудерживающая способность атмосферы увеличивается примерно на 7 % при повышении на 1 °С, что при достаточном увлажнении приводит к росту количества водяного пара в атмосфере. В итоге гумидные районы становятся более влажными, но засушливые регионы становятся ещё суше. По прогнозам климатических моделей такая картина сохранится в будущем (Trenberth, 2011). Наши данные подтверждают, что в разных частях республики тенденции колебания суммы годовых осадков различаются как по величине, так и по знаку.

В период с 1961 по 1990 г. максимальный ГТК составил 1,5 на восточной части республики, что соответствует лесной части региона. В период с 1991 по 2022 г. максимальный ГТК был 1,2–1,3 (ГМС Тоора-Хем). Минимальное значение ГТК в период с 1961 по 1990 г. составляло 0,4–0,5 в центральной части республики, что соответствует степной части, в 1991–2022 гг. — 0,3–0,4 (ГМС Кызыл). Таким образом, уменьшение значения ГТК объясняет увеличение засушливости с ростом испаряемости при повышении температуры воздуха. Станция Тоора-Хем выделяется среди остальных значительно более высокой аномалией в сравнении с другими метеостанциями.

В результате обработки данных коллекции ERA5-Land Daily получена сумма осадков в период 1961–2023 гг. по высотным уровням. Сумма осадков каждого высотного уровня отличается в зависимости от рельефа местности и растительного покрова. На рис. 2 (см. с. 228) представлено пространственное распределение суммы осадков высотных уровней 500–1000 (см. рис. 2а) и 1300–1700 м н. у. м. (см. рис. 2б).

По приведённым картам видно, что наименьшие суммы осадков сосредоточены на высотном уровне 500–1000 м н. у. м. и диапазон суммы осадков колеблется в среднем от 88,53

до 143,96 мм. Самые скудные осадки (от 18,7 до 36,8 мм) выпадают в центральной (Тувинская котловина) и южной (Убсунурская котловина) части республики. В легенде им соответствуют цвета от красного до жёлтого (см. *рис. 2а*). Наибольшие осадки выпадают на северо-восточной части республики (см. *рис. 2б*), где произрастают темнохвойные леса с преобладанием кедровых насаждений. По наблюдениям исследователей, в горах республики на высотном уровне 1300–1600 м годовые суммы осадков достигают максимума. Выше осадки не увеличиваются, температура снижается, и поэтому относительная влажность воздуха быстро нарастает. В связи с этим там доминирует кедр вместе с лиственницей и местами елью (Поликарпов и др., 1986). По данным реанализа в распределении суммы осадков выявлен статистически достоверный положительный тренд ($r^2 = 0,38$). Несмотря на значительную удалённость метеостанций друг от друга, суммы осадков характеризуются статистически значимой корреляционной связью ($r^2 = 0,3...0,4$, $p < 0,05$). Проведённые расчёты показали, что распределение осадков отличается от данных метеостанций, это можно объяснить особенностями измерения данных. По результатам реанализа изменение годовой суммы осадков имеет статистически значимый тренд. Коэффициент корреляции Пирсона равен 0,77.

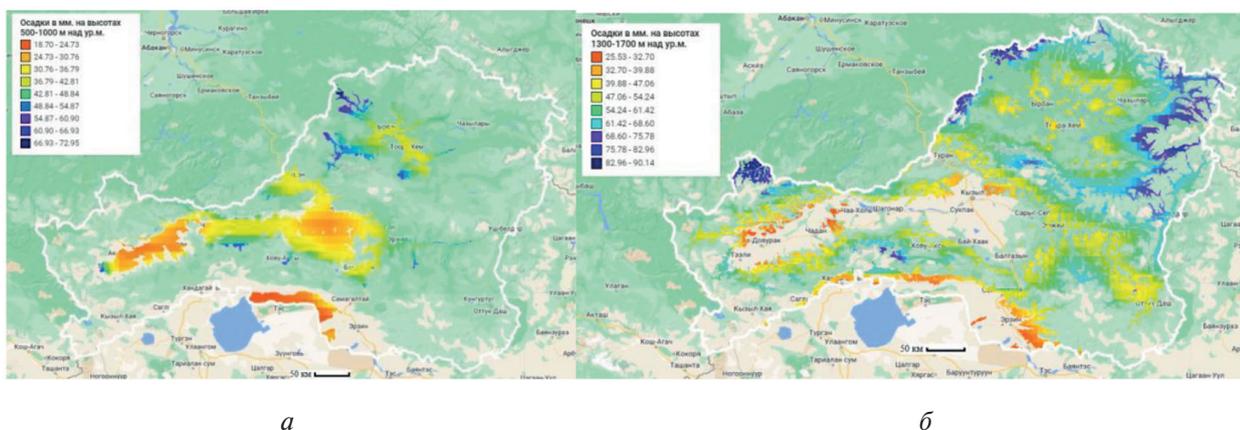


Рис. 2. Распределение суммы осадков в период 1961–2023 гг. по данным ERA5-Land на высотных уровнях: *а* — 500–1000 м н. у. м.; *б* — 1300–1700 м н. у. м.

Выводы

Полученные результаты имеют практическое значение — они уточняют диапазон регионального изменения не только суммы осадков, но и относительного увлажнения климата. Построенные модельные карты распределения суммы осадков чётко показывают, что горно-котловинный характер территории определяет дифференциацию суммы осадков с учётом высотной поясности и региональных различий. Она достаточно хорошо согласуется с картой природного (лесорастительного) районирования (Типы..., 1980).

Проведённый анализ суммы осадков на основе использованных данных показывает её изменение по сезонам года и значения за последние тридцать лет. В частности, отмечено увеличение осадков зимой в период с 1991 по 2021 г. на 20–30 % по сравнению с уровнем с 1961 по 1990 г. за счёт увеличения числа дней с осадками. Летом же отмечается сокращение суммы осадков на 20 %, что свидетельствует о возрастании засушливости климата, по крайней мере, вблизи метеостанций. В котловинах и вблизи них наблюдается повышение частоты атмосферных засух. Значения индекса увлажнения ГТК указывают на увеличение засушливости в южной части территории республики в последние годы.

Авторы выражают благодарность Ладыгиной В. П., кандидату физико-математических наук Красноярского научного центра СО РАН (Красноярск). Работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

Литература

1. Анализ и прогноз изменений климата в российской части Алтае-Саянского экорегиона и на приграничных территориях Казахстана и Монголии. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2018. 291 с.
2. *Андрейчик М. Ф., Чуликова С. А.* Использование ГИС-технологий при разработке электронных карт распределения атмосферных осадков Тувинской горной области // 8-я Международ. выставка и науч. конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь»: сб. ст. 2012. Т. 3. С. 166–170.
3. *Булыгина О. Н., Разуваев В. Н., Коршунова Н. Н., Швец Н. В.* Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2015620394. Рег. 27.02.2015.
4. *Воропай Н. Н., Рязанова А. А.* Изменения гидротермических условий на юге Сибири в 1950–2020 гг. и их связь с крупномасштабными циркуляционными процессами // Метеорология и гидрология. 2023. № 10. С. 99–109. DOI: 10.52002/0130-2906-2023-10-99-109.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменении климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 61 с. <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2.pdf>.
6. *Габбасова Д. Т., Широких П. С., Бикбаев И. Г., Федоров Н. И.* Изменение температуры и влажности в лесных сообществах вдоль градиента высоты на горе Большой Шатак // Экобиотех. 2023. Т. 6. № 3. С. 166–174. DOI: 10.31163/2618-964X-2023-6-3-166-174.
7. *Газаев Х.-М. М., Бозиева Ж. Ч., Агоева Э. А., Газаев М. А.* Изменение приземной температуры воздуха и суммы выпавших осадков в Верхне-Балкарском ущелье // Вестн. Забайкальского гос. ун-та. 2019. Т. 25. № 8. С. 14–23. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-8-14-23.
8. *Галахов В. П., Шереметов Р. Т., Самойлова С. Ю., Мардасова Е. В.* Средние многолетние осадки на территории горного узла Белухи (Центральный Алтай) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 5. С. 99–106. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-5(99-106).
9. *Гордов Е. П., Богомолов В. Ю., Генина Е. Ю., Шульгина Т. М.* Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // Вестн. Новосибирского гос. ун-та. Сер.: Информационные технологии. 2011. Т. 9. № 1. С. 56–66.
10. *Кислов А. В., Суркова Г. В.* Пространственно-детализированный климатический прогноз температуры воздуха и осадков Восточной Сибири на основе учета локальных особенностей подстилающей поверхности // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 43–51.
11. *Куулар Х. Б.* Оценка температуры ландшафтов хребта Западный Танну-Ола в Республике Тыва // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 77–85.
12. *Липка О. Н.* Изменения климата в Алтае-Саянском регионе: что происходит и каковы прогнозы? // Төв азийн экосистем: Судалгаа, хамгаалал, зохистой ашиглалт. «Увс Нуур» Олон улсын ээлжит 14-й симп. 2018. С. 50–60.
13. *Ломакина Н. Я., Лавриненко А. В.* Современные тенденции изменения температуры пограничного слоя атмосферы Сибирского региона // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 1. С. 42–50. DOI: 10.15372/AOO20220107.
14. *Макунина Н. И.* Леса Тувы: классификация и ботанико-географический обзор // Растительный мир Азиатской России: Вестн. Центрального сибирского ботанич. сада СО РАН. 2020. Т. 37. № 1. С. 40–78. DOI: 10.21782/RMAR1995-2449-2020-1(40-78).
15. *Мельник В. И., Данилович И. С., Кулешова И. Ю., Комаровская Е. В., Мельчакова Н. В.* Оценка агроклиматических ресурсов территории Беларуси за период с 1989 по 2015 г. // Природные ресурсы. 2018. № 2. С. 88–101.
16. *Назимова Д. И., Кошкарова В. Л., Данилина Д. М., Коновалова М. Е.* Пространственно-временная динамика горных темнохвойных лесов на юге Приенисейской Сибири в условиях современных изменений климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 8. С. 1224–1237. DOI: 10.31857/S2587556623080149.
17. *Парфенова Е. И., Чебакова Н. М.* Потенциальное распределение лесов в горах Южной Сибири и Северной Монголии в связи с прогнозируемыми изменениями климата к середине века // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 7. С. 1019–1031. DOI: 10.31857/S2587556623070129.
18. *Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И.* Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1986. 226 с.
19. *Прожерина Н. А., Наквасина Е. Н.* Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород европейского севера России // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журн. 2022. № 2 (386). С. 9–25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25.
20. *Ранькова Э. Я., Груза Г. В.* Индикаторы изменений климата России // Метеорология и гидрология. 1998. № 1. С. 5–18.

21. Типы лесов гор Южной Сибири / отв. ред. Смагин В. Н. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1980. 336 с.
22. Liu Q., Fu Y., Zeng Z. et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China // *Global Change Biology*. 2016. V. 22. No. 2. P. 644–655. DOI: 10.1111/gcb.13081.
23. Tchebakova N. M., Parfenova E. I. The 21st century climate change effects on the forests and primary conifers in central Siberia // *Bosque*. 2012. V. 33. No. 3. P. 253–259. DOI: 10.4067/S0717-92002012000300004.
24. Trenberth K. E. Changes in precipitation with climate change // *Climate Research*. 2011. V. 47. P. 123–138. DOI: 10.3354/cr00953.
25. Zhang D. Changes of pollen taxa diversity in the arid Central Asia under the holocenewesterlies mode: A case study of the Altai Mountains // *Arid Zone Research*. 2022. V. 39. No. 3. P. 667–675. DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.106138.

Dynamics of precipitation amounts in Tyva Republic based on ground and global data

Kh. B. Kuular, A. F. Chuldum

*Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Kyzyl 667007, Russia
E-mail: k-k-188@list.ru*

For poorly studied mountainous regions, global climate data of the Earth's surface are available. However, their applicability for the mountains of Southern Siberia has not yet been sufficiently explored. In this work, we present a map of the distribution of annual precipitation totals based on ERA5-Land Daily (European ReAnalysis 5-Land Daily) reanalysis data for Tyva Republic, located in the center of Asia, and assess the trend of dynamics over a 62-year period (1961–2023). For the digital elevation model (DEM) of the Tyva Republic, ALOS (Advanced Land Observing Satellite) data with a resolution of 30 m are used. The study provides a comparative analysis of precipitation amounts based on meteorological station data and the results of ERA-5-Land reanalysis. Additionally, precipitation amounts are analyzed across five altitude levels. According to the reanalysis data, the highest precipitation amount (averaging from 273 to 458.8 mm) is concentrated at the highest altitude level of 2200 m and above, while the lowest precipitation amount (averaging 88.5–144.0 mm) occurs at altitudes of 500–1000 m. The results obtained are acceptable for mountainous basin areas, as they demonstrate significant differentiation of precipitation amounts across all altitude levels, taking into account regional differences. Global climate data become a valuable source of information for mountainous regions with sparse data or a lack of meteorological stations. The role of reanalysis data for mountainous areas will increase with further improvements in conjunction with remote sensing data.

Keywords: trends in annual precipitation amounts, meteorological stations data, reanalysis data, altitude levels

Accepted: 15.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-224-232

References

1. *Analiz i prognoz izmenenii klimata v rossiiskoi chasti Altae-Sayanskogo ehkoregiona i na prigranichnykh territoriyakh Kazakhstana i Mongolii* (Analysis and forecast of climate changes in the Russian part of the Altai-Sayan ecoregion and in the border territories of Kazakhstan and Mongolia), Moscow: World Wildlife Fund (WWF), 2018, 291 p. (in Russian).
2. Andreichik M. F., Chupikova S. A., Gis-technology application in creating maps of atmospheric sediments distribution of Tuvinian mountain area, *8-ya Mezhdunarodnaya vystavka i nauchnyj congress "Interehkspo GEO-Sibir"* (Proc. 8th Intern. Exhibition and Scientific Congress. Interexpo GEO-Siberia), 2012, Vol. 3, pp. 166–170 (in Russian).

3. Bulygina O. N., Razuvaev V. N., Korshunova N. N., Shvets N. V., *Opisanie massiva dannykh mesyachnykh summ osadkov na stantsiyakh Rossii* (Description of the array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations), Certificate of state registration of the database No. 2015620394 (RU), Reg. 27.02.2015.
4. Voropay N. N., Ryazanova A. A., Changes in hydrothermal conditions in southern Siberia in 1950–2020 and their relation to large-scale circulation processes, *Russian meteorology and hydrology*, 2023, Vol. 48, No. 10, pp. 897–904, DOI: 10.3103/S1068373923100096.
5. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmenenii klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), Moscow: Roshydromet, 2014, 61 p. (in Russian), <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2.pdf>.
6. Gabbasova D. T., Shirokikh P. S., Bikbaev I. G., Fedorov N. I., Temperature and moisture changes in forest communities along the elevation gradient on Bolshoi Shatak Mountain, *Ecobiotech*, 2023, Vol. 6, No. 3, pp. 166–174 (in Russian), DOI: 10.31163/2618-964X-2023-6-3-166-174.
7. Gazaev H.-M. M., Bozieva Zh. Ch., Agoeva E. A., Gazaev M. A., Changes in the surface temperature of air and amount of dropped draft in the Upper-Balkar Gorge, *Transbaikal State University J.*, 2019, Vol. 35, No. 8, pp. 14–23 (in Russian), DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-8-14-23.
8. Galakhov V. P., Sheremetov R. T., Samoilova S. Yu., Mardasova E. V., Long-term average annual precipitation at the Belukha mountain knot (Central Altai), *Earth's Cryosphere*, 2017, Vol. 21, No. 5, pp. 82–88, DOI: 10.21782/EC1560-7496-2017-5(82-88).
9. Gordov E. P., Bogomolov V. Yu., Genina E. Yu., Shul'gina T. M., Analysis of regional climate processes in Siberia: Method, data and some results, *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2011, V. 9, No. 1, pp. 56–66 (in Russian).
10. Kislov A. V., Surkova G. V., Space-detailed climatic forecasting of air temperature and precipitation in Eastern Siberia on the basis of accounting for local features of the underlying surface, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2009, Vol. 34, No. 3, pp. 165–170, DOI: 10.3103/S1068373909030042.
11. Kuular Kh. B., Estimation of land surface temperature for the Western Tannu-Ola Range in the Tyva Republic, *Russian meteorology and hydrology*, 2019, Vol. 44, No. 9, pp. 632–638, DOI: 10.3103/S1068373919090073.
12. Lipka O. N., Climate change in Altai-Sayan region: What is happening and what are the perspectives? In: *Töv aziin ehkositem: Sudalгаа, хамгаалал, зөхистөй ашиглалт. “Uvs Nuur” Olon ulsyn ehehlzhit 14-i simp.* (Asian Ecosystems: Research, Conservation, and appropriate use. “Uvs Nuur” international quarterly symposium), 2018, pp. 50–60 (in Russian).
13. Lomakina N. Ya., Lavrinenko A. V., Modern trends in the temperature of the atmospheric boundary layer over Siberia Region, *Optika atmosfery i okeana*, 2022, Vol. 35, No. 1, pp. 42–50 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20220107.
14. Makunina N. I., The forests of Tuva: classification and geobotanical review, *Flora of Asian Russia*, 2020, Vol. 37, No. 1, pp. 40–78 (in Russian), DOI: 10.21782/RMAR1995-2449-2020-1(40-78).
15. Melnik V. I., Danilovich I. S., Kuliashova I. Y., Komarovskaya E. V., Mel'chakova N. V., Assessment of the agroclimatic resources of the territory of Belarus for the period 1989–2015, *Natural Resource*, 2018, No. 2, pp. 88–101 (in Russian).
16. Nazimova D. I., Koshkarova V. L., Danilina D. M., Konovalova M. E., The spatio-temporal dynamics of mountain dark coniferous forests in the south of Priyenisei Siberia in the climate change, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2023, Vol. 87, No. 8, pp. 1224–1237 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556623080149.
17. Parfenova E. I., Tchebakova N. M., Potential forest distribution over the South Siberian and North Mongolian Mountains related to predicted climate change by the midcentury, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2023, Vol. 87, No. 7, pp. 1019–1031 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556623070129.
18. Polikarpov N. P., Tchebakova N. M., Nazimova D. I., *Klimat i gornye lesa Yuzhnoj Sibiri* (Climate and mountain forests of Southern Siberia), Novosibirsk: Science, Siberian Branch, 1986, 226 p. (in Russian).
19. Prozherina N. A., Nakvasina E. N., Climate change and its impact on adaptation and intraspecific variability of conifer species of the European North of Russia, *Russian Forestry J.*, 2022, No. 2, pp. 9–25 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25.
20. Rankova E. A., Gruza G. V., Indicators of climate change in Russia, *Russian meteorology and hydrology*, 1998, No. 1, pp. 5–18 (in Russian).
21. *Tipy lesov gor Yuzhnoj Sibiri* (Types of forests of the mountains of Southern Siberia), Novosibirsk: Science, Siberian Branch, 1980, 336 p. (in Russian).
22. Liu Q., Fu Y., Zeng Z. et al., Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China, *Global Change Biology*, 2016, Vol. 22, No. 2, pp. 644–655, DOI: 10.1111/gcb.13081.

23. Tchebakova N., Parfenova E., The 21st century climate change effects on the forests and primary conifers in central Siberia, *Bosque*, 2012, Vol. 33, No. 3, pp. 253–259, DOI: 10.4067/S0717-92002012000300004.
24. Trenberth K. E., Changes in precipitation with climate change, *Climate Research*, 2011, Vol. 47, pp. 123–138, DOI: 10.3354/cr00953.
25. Zhang D., Changes of pollen taxa diversity in the arid Central Asia under the holocenewesterlies mode: A case study of the Altai Mountains, *Arid Zone Research*, 2022, Vol. 39, No. 3, pp. 667–675, DOI: 10.1016/j.quascirev.2019.106138.