

Научная статья

УДК 551.583

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.4>

МОДЕЛЬ СИНУСОИДАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ СЕЛЕВЫХ СХОДОВ

Борис Азреталиевич Ашабоков^{1,2},
Алла Амарбиевна Ташилова^{3*},
Лара Асировна Кешева⁴,
Наталья Вячеславовна Теунова⁵

^{1,3,4,5} Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, 360030, Нальчик, Российская Федерация)

² Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН (37А, ул. И. Арманд, Нальчик, 360000, Российская Федерация)

^{1,2} ashabokov.boris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

³ tashilovaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴ kesheva.lara@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁵ nata0770@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Синусоидальная модель динамики рядов селевых сходов, температуры и осадков в теплые сезоны в высокогорной зоне Кабардино-Балкарии дополняет ранее полученный статистический анализ средних характеристик рядов, результаты сравнительного анализа их средних величин за два подпериода (базовый 1953–1983 гг. и современный 1984–2015 гг.), повышает качество однонаправленной регрессионной модели количества сходов селей и метеопараметров за последние 60 лет. В статье показано, что использование функции синусоидальной регрессии дает возможность выявить цикличность временных рядов, что поможет в оценке динамики сходов селей с учетом долговременных изменений климатических переменных. Повышение эффективности моделей подтверждено критериями. Коэффициент детерминации R^2 , определенный для моделей линейной регрессии, возрастает в моделях синусоидальной регрессии: для рядов с количеством селей от $R^2 = 0,067$ до $R^2 = 0,645$, для осадков от $R^2 = 0,028$ до $R^2 = 0,653$, для температур от $R^2 = 0,012$ до $R^2 = 0,829$. В модели синусоидальной регрессии при использовании восьми гармоник на фоне медленных изменений добавляются короткопериодные пульсации. В ряду с селями – это короткие периоды от $T = 2,4$ лет до $T = 10,7$ лет на фоне основного периода $T = 62$ года. В ряду

температур – короткие периоды от $T = 1,9$ года до $T = 5,2$ лет к длинному периоду $T = 63$ года. В ряду с осадками к коротким периодам от $T = 2,2$ лет до $T = 8,7$ лет добавляется длинный период $T = 20,1$ года. Выявленные длиннопериодические колебания у селей и температур ($T = 62$ года, 63 года) связаны со значительными и нелинейными изменениями в элементах этих рядов в течении исследуемого периода. В отличие от этих рядов, в ряду осадков доминируют короткопериодические изменения ($T = 4$ года) на фоне медленного колебания с периодом $T = 20,1$ года.

Ключевые слова: количество сходов селей, сумма осадков, средние температуры, синусоидальная регрессия, периоды, эффективность модели

Для цитирования: Ашабоков Б. А., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Модель синусоидальной регрессии для оценки динамики селевых сходов // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 3. С. 71–94. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.4>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.04.2024;
одобрена после рецензирования 25.06.2024;
принята к публикации 02.09.2024.

1.6.18.

Atmospheric and Climate Sciences
(Physical and Mathematical Sciences)
Research article

Sinusoidal regression model for assessment of mudflows dynamics

Boris A. Ashabokov^{1,2},
Alla A. Tashilova^{3*},
Lara A. Kesheva⁴,
Nataliya V. Teunova⁵

^{1, 3, 4, 5} High-Mountain Geophysical Institute (2, Lenin Ave., 360030, Nalchik, Russian Federation)

² Institute of Informatics and Regional Management Problems of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (37A, I. Armand St., Nalchik, 360000, Russian Federation)

^{1, 2} ashabokov.boris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

³ tashilovaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴ kesheva.lara@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁵ nata0770@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

* Corresponding author

Abstract.

A sinusoidal model of the dynamics of mudflow series, temperature and precipitation in the warm seasons in the high-mountain zone of Kabardino-Balkaria complements the previously obtained statistical analysis of the average characteristics of the series, results of a comparative analysis of their average values for two subperiods (base 1953–1983 and modern 1984–2015), improves the quality of the unidirectional regression model of the number of mudflows and meteorological parameters over the past 60 years. The article shows that the use of the sinusoidal regression function makes it possible to identify the cyclicity of time series, which will help in assessing the dynamics of mudflows taking into account long-term changes in climate variables. The increased efficiency of the models is confirmed by the criteria. The coefficient of determination R^2 , determined for linear regression models, increases in sinusoidal regression models: for series with the number of mudflows from $R^2 = 0.067$ to $R^2 = 0.645$, for precipitation from $R^2 = 0.028$ to $R^2 = 0.653$, for temperatures from $R^2 = 0.012$ to $R^2 = 0.829$. In the sinusoidal regression model, using eight harmonics, short-period ripples are added against the background of slow changes. In the series with mudflows, these are short periods from $T = 2.4$ years to $T = 10.7$ years against the background of the main period $T = 62$ years. In the series of temperatures there are short periods from $T = 1.9$ years to $T = 5.2$ years to a long period $T = 63$ years. In the series with precipitation, a long period $T = 20.1$ years is added to the short periods from $T = 2.2$ years to $T = 8.7$ years. The identified long-period fluctuations in mudflows and temperatures ($T = 62$ years, 63 years) are associated with significant and nonlinear changes in the elements of these series during the period under study. In contrast to these series, the precipitation series is dominated by short-period changes ($T = 4$ years) against a background of slow fluctuations with a period of $T = 20.1$ years.

Keywords:

mudflows quantity, total precipitation, average temperatures, sinusoidal regression, periods, model efficiency

For citation:

Ashabokov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. Sinusoidal regression model for assessment of mudflows dynamics. Science. Innovations. Technologies. 2024;(3):71-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.4>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 16.04.2024;
approved after reviewing 25.06.2024;
accepted for publication 02.09.2024.

Введение

Необходимость количественной оценки развития склоновых явлений на фоне изменения климата в высокогорной зоне Кавказа с помощью использования различных математических инструментов определяется их значительной активизацией в последние десятилетия [1–5]. Как известно, модели временных рядов применяются в исследованиях динамики значительного числа реальных процессов различной природы. В статье [6] были определены некоторые количественные характеристики рядов селевых сходов, средней температуры и сумм осадков в высокогорной зоне КБР, построены линейные тренды, характеризующие долговременную изменчивость исследуемых рядов в теплые сезоны 1953–2015 гг. Под долговременной изменчивостью понимается вклад в процесс изменения параметров ряда либо тренда, либо долговременного колебания, то есть колебания с периодом, гораздо больше одного года. В результате проведенного линейного регрессионного анализа была получена однонаправленная линейная модель, демонстрирующая тенденцию роста количества селей на статистически значимом уровне (~ 1 случай/10 лет, $R^2 = 0,067$), незначительный рост сумм осадков (1,66 мм/мес. / 10 лет, $R^2 = 0,028$) и средней температуры (0,05 °C / 10 лет, $R^2 = 0,012$). При анализе полученных линейных трендов можно сделать вывод о тенденции увеличения количества сходов на фоне современного изменения климата, что характеризует долговременную тенденцию развития данного явления. При этом она выражается некоторой монотонной функцией (однонаправленный тренд). Такой однонаправленный тренд не может помочь в объяснении причин вызывающих рост селевых сходов, поскольку климатические изменения цикличны и для реальной картины необходимо на фоне медленных изменений выявить периоды, соотносящиеся с периодами климатических изменений.

Периодичность природных процессов и явлений – необходимое свойство их существования и развития. Цикличность природных процессов, в том числе опасных склоновых явлений, происходит под воздействием внешних причин, в основном, климатических изменений. В работах [7, 8] авторы приводят результаты исследований, которые дают основание считать, что большие планеты ока-

зывают динамическое воздействие на параметры и циклы природных явлений. В работе [9] по результатам параметризации сезонной и долговременной изменчивости толщины снежного покрова на юге европейской территории России было получено, что сезонный ход изменения остатков (разница между модельным значением и реальными значениями) имеет долговременную изменчивость с выявленным периодом цикличности $T \approx 18,8$ лет, что обусловлено приливными колебаниями (Луна, Солнце), действующими на различные геосферы Земли, в том числе на атмосферу. В работе [10] авторы отмечают, что об опасности проявлений селевых процессов можно судить по характеристикам космической погоды. При этом целесообразно уделять внимание анализу тех показателей, которые связаны с изменениями активности Солнца. Авторы полагают, что вспышечная активность Солнца может оказать влияние на формирование селевых потоков в результате попадания компонентов солнечного ветра в приповерхностную область Земли. Колебания солнечной активности, повторяющиеся в среднем через 11 лет, отражаются в возмущениях магнитного поля Земли, в погодных и гидрологических явлениях, в динамике опасных природных явлений и т. д., эффект воздействия которых проявляется в обнаруженных периодах порядка 11 лет в указанных природных явлениях, что делает актуальным поиск скрытых периодичностей в многолетних данных селевых сходов.

Материалы и методы исследований

Для исследования были использованы данные рядов схода селей из работы Кондратьевой Н.В. [11], данные климатических параметров были предоставлены Северо-Кавказским УГМС. В работе получены модели синусоидальной регрессии, позволяющие определить некоторые спектральные характеристики (период, амплитуда, фаза) рядов числа сходов селей, средней температуры и сумм осадков в теплые сезоны года (май-сентябрь) в высокогорной зоне Кабардино-Балкарии (Терскол).

Для моделирования временных рядов и выявления периодов цикличности была использована функция синусоидальной регрессии из статистической программы Past 4.03 [12]. Функция позволяет к исходным данным рядов подогнать сумму до восьми синусоид

с периодами, амплитудами и фазами. Алгоритм основан на критерии наименьших квадратов и сингулярной величине декомпозиции.

Каждая синусоида определяется выражением:

$$y = A \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{T} (t - t_0) - \varphi_0 \right], \quad (1)$$

где A – амплитуда,
 T – период,
а φ_0 – начальная фаза,
 t_0 – начальное значение t .

Для определения качества и сравнения статистических моделей при выбранном количестве параметров в программе Past 4.03 используются следующие информационные критерии: коэффициент детерминации R^2 на заданном уровне значимости p (R^2 при $p < 0,05$); хи-квадрат (χ^2); критерий Акаике (AIC).

Коэффициент детерминации R^2 характеризует долю дисперсии, обусловленную регрессией, в общей дисперсии показателя. Величина p ($p < 0,05$) используется для выявления статистически значимого коэффициента детерминации R^2 в моделях линейной и синусоидальной регрессии. F -тест Фишера определяет значимость коэффициента детерминации R^2 ; критерий Стьюдента ($Stud$) определяет статистическую значимость коэффициентов моделей.

Значение χ^2 является мерой ошибки подбора – большие значения означают худшее соответствие между моделью и исходными данными, и, наоборот, меньшие значения – лучшее соответствие. Критерий хи-квадрат позволяет оценить значимость различий между фактическим (выявленным в результате исследования) количеством исходов и теоретическим количеством, которую можно ожидать в изучаемых группах.

Основная формула для расчета хи-квадрата Пирсона:

$$\chi_n^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (2)$$

где O_i – наблюдаемые (Observed) частоты,
 E_i – ожидаемые (Expected).

Полученное значение хи-квадрата соотносится с критическим значением хи-квадрата из статистических таблиц [13]. Критическое значение хи-квадрата, как и для большинства статистических критериев зависит от степени свободы df и уровня достоверности p (в нашем случае $p = 0,05$).

Информационный критерий Акаике (AIC) [14] оценивает правильность количества использованных параметров (в нашем случае – количество синусоид), по которой строилась модель: данный подход позволяет сравнивать модели, оцененные по выборкам разного объема. Чем меньше значение критерия, тем лучше модель. Особенностью критерия является введение штрафа за число параметров модели. AIC должен быть как можно ниже, чтобы максимизировать подгонку, но не допускать переобучения.

Значение критерия вычисляется по формуле:

$$AIC = -2 \ln(\hat{L}) + 2k, \quad (3)$$

где $\hat{L}$ – максимальное значение логарифмической функции правдоподобия модели,
 k – количество параметров модели.

Логарифмическая функция правдоподобия отражает вероятность того, что значение, предсказанное моделью, будет соответствовать фактическому. При росте числа параметров в модели повышается ее соответствие исходному набору данных (модель лучше соответствует данным), модель характеризуется высоким значением логарифмического правдоподобия и небольшим значением AIC .

Результаты исследований и их обсуждение

Приступая к анализу долговременной изменчивости рядов числа селей, осадков и температуры, мы прежде всего исследовали их с применением простейшей трендовой модели – линейной регрессии [6]. Результаты регрессии рядов с указанием трендов, их погрешностей, эффективности моделей (R^2) и значений статистик Фишера (F) и Стьюдента ($Stud$) сведены в таблицу 1. Из таблицы 1 видно, что однонаправленные изменения (линейные тренды)

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСТРОЕНИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ
Table 1. Results of constructing unidirectional models

Ряды 1953–2015 гг.	Тренд	Погрешность	R^2	$F_{\text{факт}}$	$Stud_{\text{факт}}$	Значимость p^*
Число схода селей	0,08 (n/год)	0,038	0,067	4,364	2,089	0,041
Осадки	0,166 (мм/год)	0,124	0,028	0,187	1,335	0,187
Температура	0,005 (°C/год)	0,0056	0,012	0,761	0,873	0,386

* статистически значимый на 5 %-ном уровне коэффициент детерминации выделен жирным.
Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.

осадков и температуры в теплые сезоны в период 1953-2015 гг. отсутствуют ($R^2 = 0,028$, $p = 0,187$ для осадков; $R^2 = 0,0123$, $p = 0,386$ для температуры), а для ряда числа селей тренд имеется, но с недостаточно высоким R^2 ($R^2 = 0,067$, $p = 0,041$). По показателям статистической надежности ($R^2 = 0,067$, $F_{\text{факт.}} = 4,36$ превышает $F_{\text{теор.}} = 4,0$ на 5 %-ном уровне $p = 0,041 < 0,05$) данная регрессионная модель обеспечивает вероятность получения такого тренда не случайно. Увеличение количества селей имеет место на статистически значимом уровне.

Перейдем от однонаправленного тренда (линейная регрессия) с невысоким коэффициентом детерминации R^2 к модели синусоидальной регрессии с высоким R^2 , позволяющей к медленному тренду добавить изменения с выявленными периодами T , формирующими режим изменения параметров ряда [12]. Для создания модели синусоидальной регрессии было использовано пошаговое включение гармоник, начиная с первой гармоники и ограничиваясь 8 гармониками. Результаты построения синусоидальной регрессии с по-

мощью использования 1-й гармоники, 2-х гармоник, 3-х гармоник и т.д. до 8-ми гармоник, представлены на рисунке 1 и в таблице 2.

Из рисунка 1а (ряд числа схода селей) видно, что с учетом одной гармоники в исходном ряду выделяется медленный синусоидальный тренд с периодом $T = 62$ года, где максимальное число схода селей приходится на середину 90-х годов, а минимальное их количество – на середину 60-х гг. XX столетия. Эффективность модели и ее качество модели определяется коэффициентом детерминации $R^2 = 0,157$ с уровнем значимости $p = 0,002 < 0,05$, значением $\chi^2 = 1678$ и коэффициентом $AIC = 1682,2$.

При двух гармониках добавляется период $T = 7$ лет, который описывает пульсацию роста и уменьшения числа селей каждые 7 лет на фоне их плавного роста с максимумом в середине 90-х гг. XX столетия. Качество модели повышается, что характеризуется ростом коэффициента детерминации $R^2 = 0,2665$ ($p = 0,0005$) и снижением $\chi^2 = 1460$ и $AIC = 1468,8$.

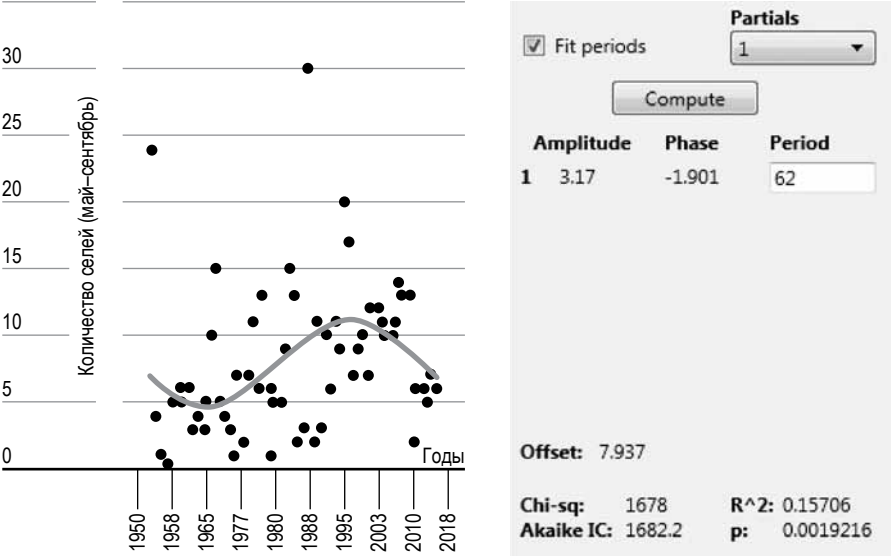
При трех гармониках выделяется период $T \approx 11$ лет, который формирует амплитуды A синусоиды, подгоняя модель под исходные данные: увеличивая и уменьшая их с учетом 11-летнего периода. Выделяемая периодичность в рядах селевых сходов, вероятно, имеет корреляционную связь со средней периодичностью солнечной активности (≈ 11 лет), что совпадает с некоторыми выводами из работы [10].

При включении в модель 8-ми гармоник, имеем наиболее точное приближение к реальному ряду числа селевых сходов в теплые сезоны 1953–2015 гг., эффективность модели возрастает, что отражается в информационных критериях $R^2 = 0,6445$ ($p \ll 0,05$); $\chi^2 = 707,66$ и $AIC = 751,48$. Используя данные по амплитуде, фазе и периоду из таблицы 2, может быть построена синусоидальная модель числа сходов селей по формуле (2).

Для построения модели синусоидальной регрессии рядов сумм осадков и средней температуры используем такой же алгоритм с пошаговым включением гармоник от одной до восьми. Результаты представлены на рисунках 2, 3 и в таблицах 3, 4.

В ряду с осадками при использовании одной гармоники наиболее сильный вклад в формирование режима осадков вносит ко-

б) 1 гармоника



б) 2 гармоники

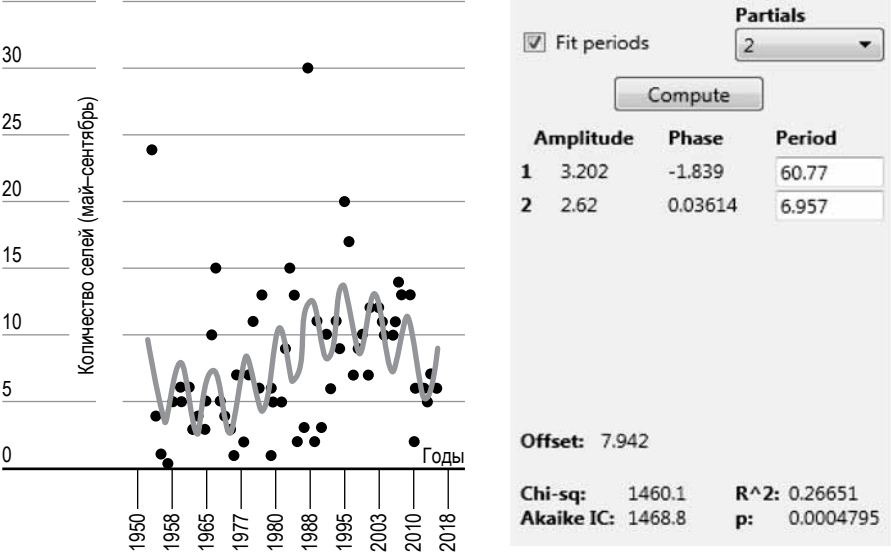
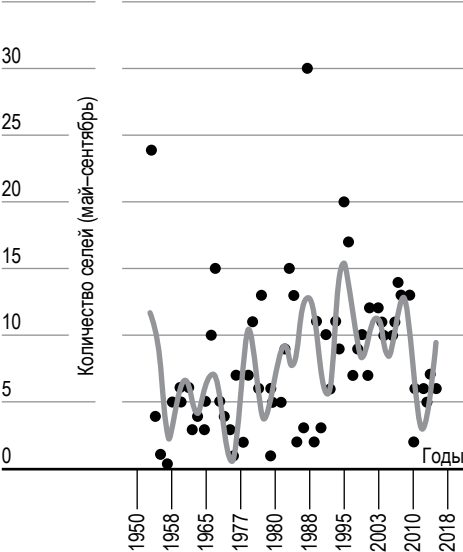


Рис. 1. Модель синусоидальной регрессии числа схода селей.
Fig. 1. Sinusoidal regression model of the number of mudflows.
Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.

в) 3 гармоника



Partials

☒ Fit periods

3

Compute

	Amplitude	Phase	Period
1	3.162	-1.827	60.77
2	2.535	0.01984	6.957
3	2.141	0.1481	10.65

Offset: 7.964

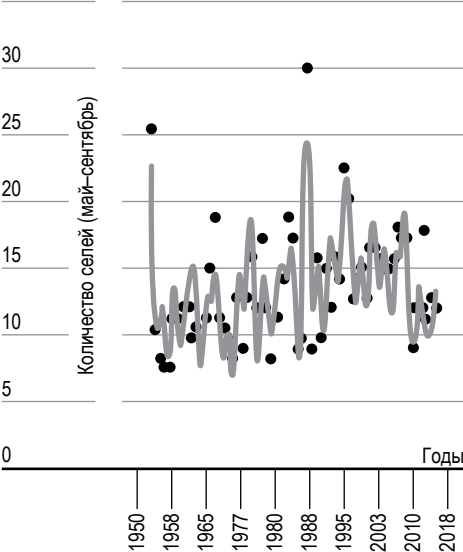
Chi-sq: 1316.4

R²: 0.33875

Akaike IC: 1329.9

p: 0.00029812

г) 8 гармоник



Partials

☒ Fit periods

8

Compute

	Amplitude	Phase	Period
1	3.149	-1.844	60.77
2	2.568	0.07546	6.957
3	2.08	0.1568	10.65
4	2.059	0.4855	4.222
5	1.935	-0.4154	2.426
6	1.789	-0.3395	4.914
7	2.208	0.04278	3.062
8	2.046	-1.091	2.846

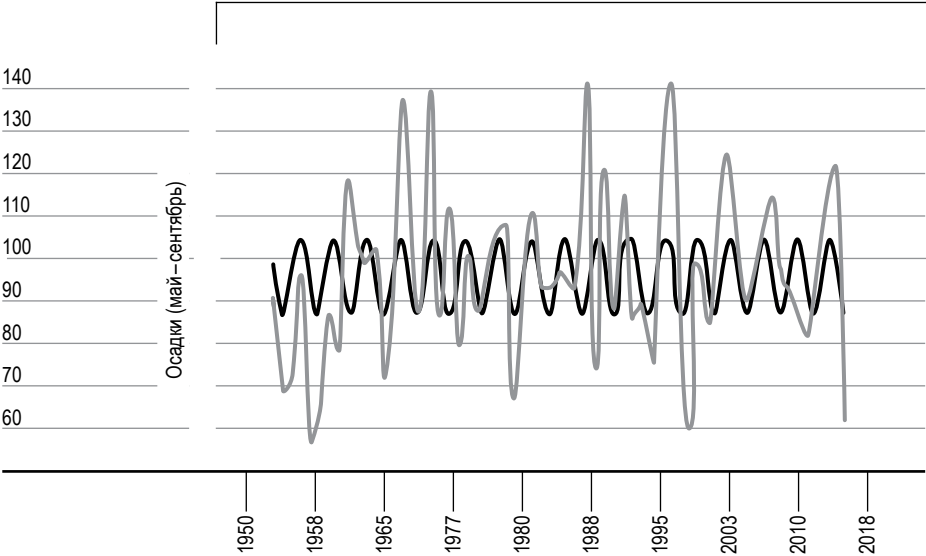
Offset: 7.941

Chi-sq: 707.66

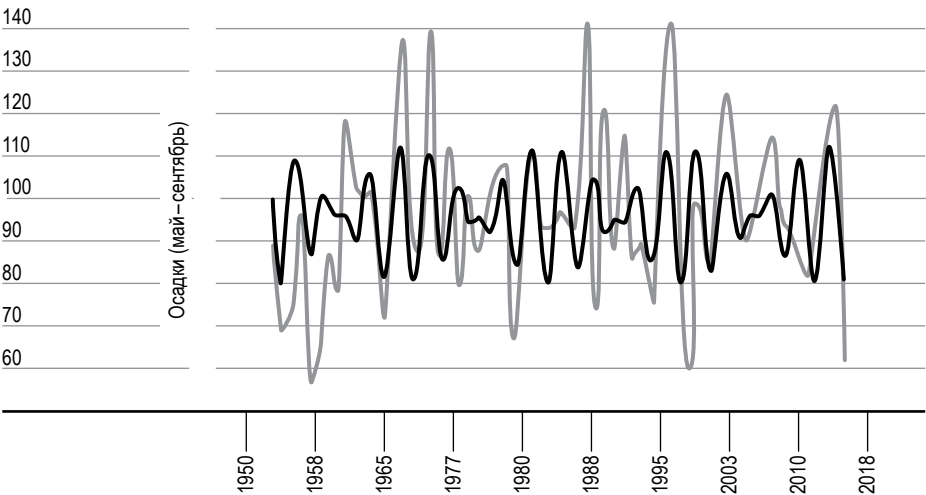
Akaike IC: 751.48

R^2: 0.64451

p: 4.4639E-06

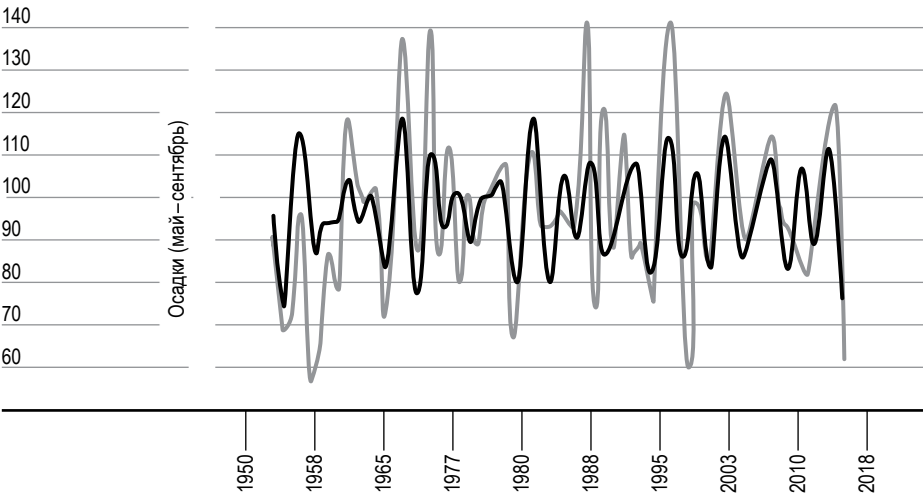


а) 1 гармоника, $T = 3,6$ года, $R^2 = 0,1238$, $\chi^2 = 17726$, $AIC = 17730$.

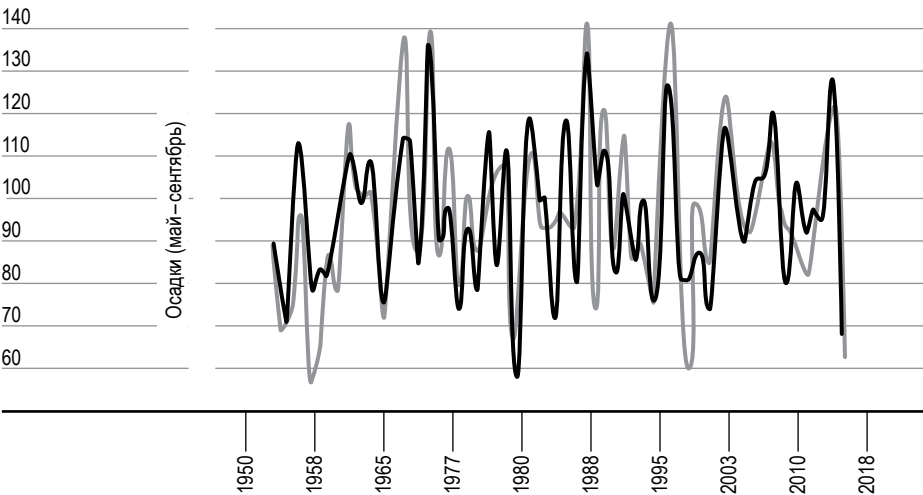


б) 2 гармоники, $T = 3,6; 2,9$ года, $R^2 = 0,22$, $\chi^2 = 15768$, $AIC = 15777$.

Рис. 2. Модель синусоидальной регрессии сумм осадков.
Fig. 2. Sinusoidal regression model of precipitation amounts.
Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.



в) 3 гармоника, $T = 3,6; 2,9; 5,1$ года, $R^2 = 0,304$, $\chi^2 = 140078$, $AIC = 14091$.



г) 8 гармоника, периоды в табл. 2; $R^2 = 0,65$, $\chi^2 = 7009$, $AIC = 7053$.

Таблица 2. ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ ЧИСЛА СХОДА СЕЛЕЙ (8 ГАРМОНИК)
Table 2. Data for the sinusoidal regression model of the number of debris flows (8 harmonics)

Амплитуда, A	Фаза, φ_0	Период, T (годы)	
3,149	-1,84	61	
2,268	0,07546	7	
2,08	0,1568	10,7	
2,06	0,4855	4,2	
1,935	-0,4154	2,4	
1,789	-0,3395	5	
2,208	0,04278	3,1	
2,046	-1,091	2,8	

Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.

роткий период $T = 3,6$ года. При добавлении 2-й гармоники влияние еще одного короткого периода $T = 2,9$ года уточняет амплитуду изменений ряда осадков и увеличивает качество модели до $R^2 = 0,22$ ($p = 0,003$).

Ту же функцию выполняет 3-я гармоника и так далее до 8-й гармоники, в этом случае добавляется самый длинный период $T = 20,1$ года. Эффективность модели с 8 гармониками максимальная: коэффициент детерминации повышается до $R^2 = 0,65$ ($p \ll 0,05$), уменьшаются значения хи-квадрата и критерия Акаике до $\chi^2 = 7009$ и $AIC = 7053$.

Таким образом, в формировании синусоидальной модели ряда с осадками наиболее значимо выделяются короткие периоды от $T = 2,1$ года до $T = 8,7$ лет и один длинный период $T = 20,1$ года (табл. 3).

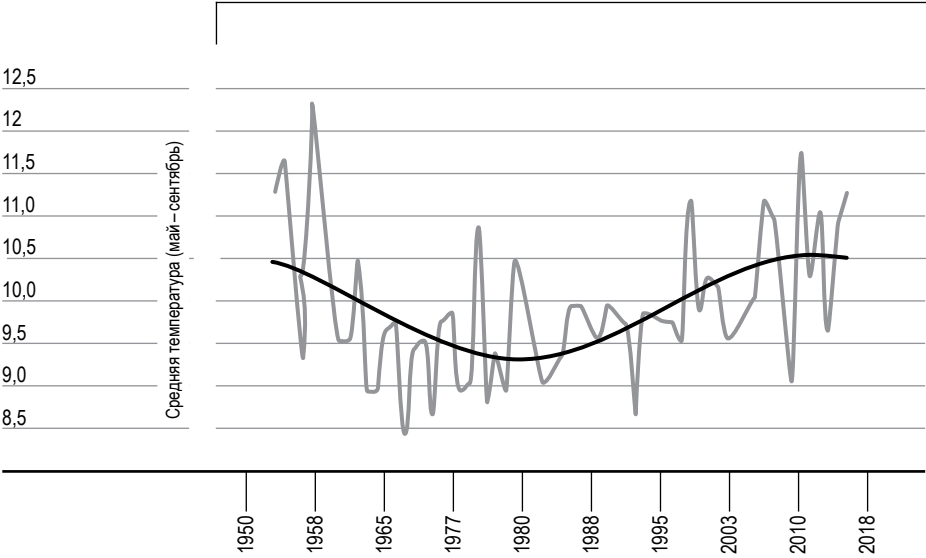
Таблица 3. ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ РЯДА
ОСАДКОВ (8 ГАРМОНИК)
Table 3. Data for sinusoidal regression model of precipitation series
(8 harmonics)

Амплитуда, A	Фаза, φ_0	Период, T (годы)	
8,145	-1,259	3,6	
7,797	-1,45	2,9	
7,085	-2,49	5	
7,551	-0,6476	8,7	
8,601	0,9235	2,1	
7,308	2,982	2,2	
6,685	3,057	6,5	
6,331	-1,853	20,1	

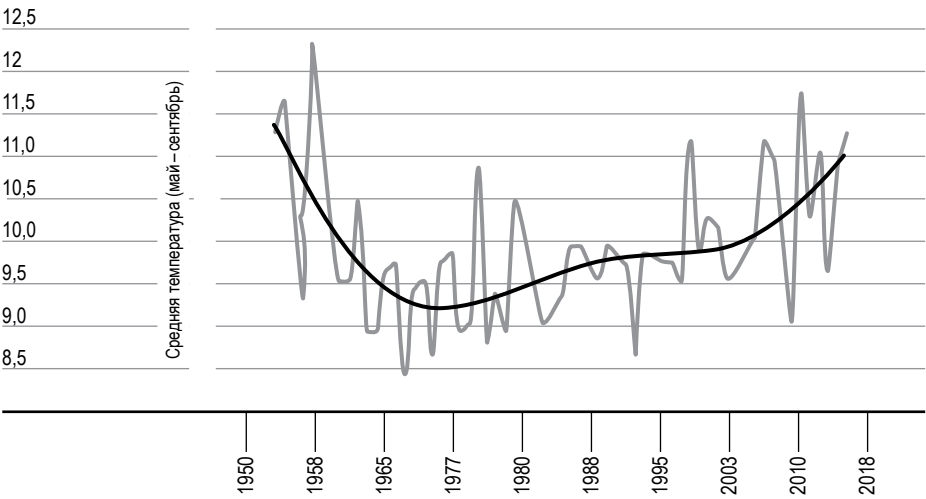
Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.

Из рисунка 3, а видно, что с учетом одной гармоники в синусоидальной модели средней температуры выделяется длинный период $T = 63$ года, где минимум температуры приходится на интервал с середины 60-х до середины 80-х лет прошлого столетия, а максимумы на 50-е гг. XX столетия и 10-е гг. 21-го столетия. По сравнению с другими рядами одна гармоника в ряду температур достаточно точно и на статистически значимом уровне описывает медленные изменения тренда ($R^2 = 0,28, p \ll 0,05$).

При добавлении второй гармоники, выявленный длинный период ($T = 64$ года, $\varphi_0 = -3,113$) уточняет ход кривой изменения температуры (рис. 3, б), а именно, смещает минимум температуры на середину 70-х лет прошлого столетия, максимумы остаются там же,

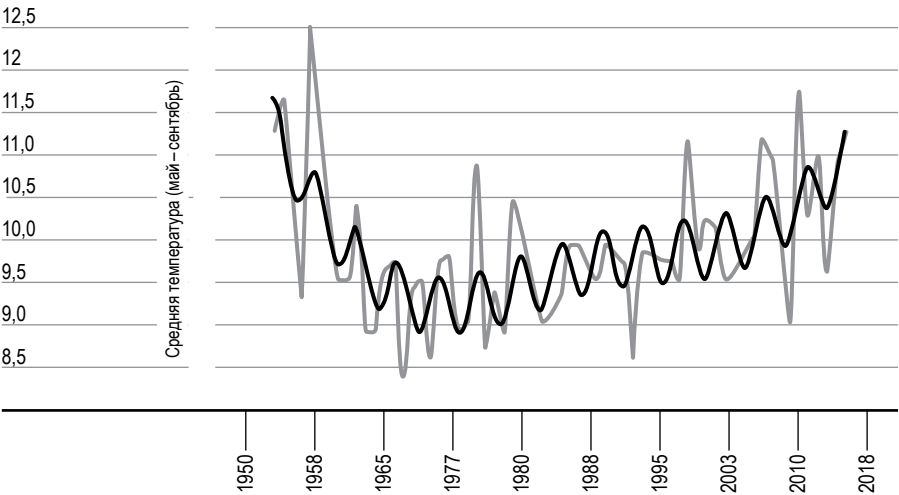


а) 1 гармоника, $R^2 = 0,28$ ($p \ll 0,05$), $T = 63$ года, $\varphi = 0,01838$; $\chi^2 = 29,06$, $AIC = 33,26$.

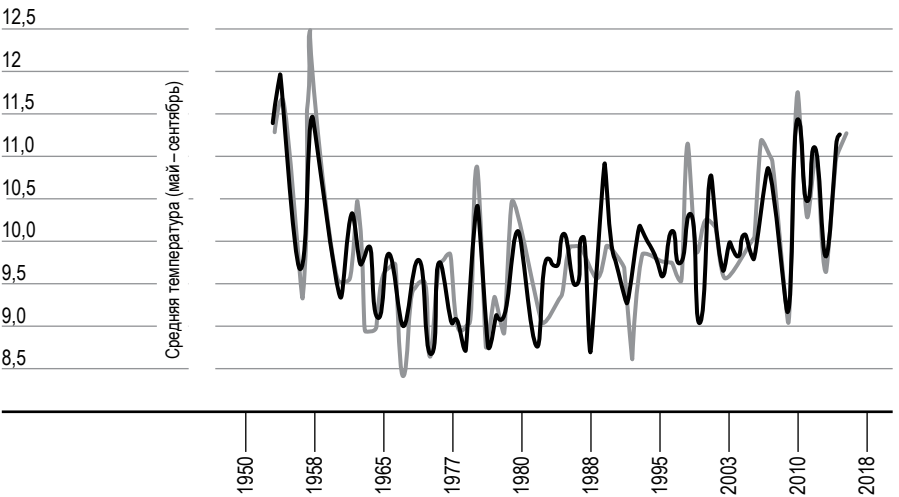


б) 2 гармоники, $R^2 = 0,62$ ($p \ll 0,05$), $T = 63$ года, $\varphi = 0,01838$, $T = 64$ года, $\varphi = -3,123$; $\chi^2 = 23,68$, $AIC = 32,37$.

Рис. 3. Модель синусоидальной регрессии средней температуры.



в) 3 гармоники, $T = 64$ года; 64 года; $4,4$ года; $R^2 = 0,67$, $\chi^2 = 19,73$, $AIC = 33,23$.



г) 8 гармоник, периоды в табл. 3. $R^2 = 0,83$, $\chi^2 = 10,38$, $AIC = 54,20$.

Fig. 3. Sinusoidal regression model of average temperature.
Источник: составлено авторами /Source: compiled by the authors.

в начале и конце исследуемого периода (1953–2012 гг.). Качество модели увеличивается: с $R^2 = 0,28$ до $R^2 = 0,62$ ($p \ll 0,05$).

При добавлении 3-й гармоники добавляется короткий период $T = 4,4$ года, что улучшает качество модели до $R^2 = 0,67$ ($p \ll 0,05$). Медленный тренд остается таким же синусоидальным, при этом вдоль него появляются пульсации температуры с максимумами каждые 4 года (рис. 3, в).

При увеличении гармоник до восьми происходит уточнение амплитуд пульсаций (рис. 3, з). Выделяются короткие периоды от $T = 2$ лет до $T = 5$ лет и два длинных периода по $T = 64$ года с разными фазами, данные представлены в таблице 4.

Таблица 4. ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ РЯДА ТЕМПЕРАТУР (8 ГАРМОНИК)
Table 4. Data for sinusoidal regression model of temperature series (8 harmonics)

Амплитуда, A	Фаза, φ_0	Период, T (годы)	
9208	0,01838	64	
9207	-3,123	64	
0,3236	0,2434	4,4	
0,2701	2,32	3,5	
0,2505	2,336	2,9	
0,2378	-1,875	2,3	
0,2236	1,934	1,9	
0,2211	0,1653	5,2	

Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors.

Из сравнительного анализа рядов селей, температур

и осадков при пошаговом включении гармоник в функцию синусоидальной регрессии следует, что в отличие от рядов с селями и температурой, в ряду осадков наиболее значимыми являются короткопериодические пульсации ($T = 4$ года) на фоне медленного изменения с периодом $T = 20,1$ года.

Заключение

Проведенный анализ позволил оценить тенденцию изменения числа схода селей (в основном дождевого генезиса) на фоне долговременных изменений климатических переменных в теплый сезон (май-сентябрь) 1953–2015 гг. С целью выявления особенностей временной изменчивости и выделения возможных периодичностей исследуемых рядов был проведен спектральный анализ, реализованный в программе Past 4.03. Для оценки изменения числа селей в теплые сезоны с учетом долговременных изменений климатических переменных построены модели синусоидальной регрессии. Получено, что:

- с использованием одной гармоники в ряду с селями выделяется медленный тренд с периодом $T = 62$ года, который позволил выделить рост количества схода селей в 90-е гг. XX столетия ($R^2 = 0,157$); в ряду с осадками была выявлена цикличность ряда сумм осадков с коротким периодом $T = 3,6$ года ($R^2 = 0,124$); в ряду с температурами выделяется период $T = 63$ года с максимальными значениями температур в начале и конце исследуемого периода 1953–2015 гг. ($R^2 = 0,28$).
- при использовании восьми гармоник на фоне медленных изменений добавляются короткопериодные пульсации. В ряду с селями – это короткие периоды от $T = 2,4$ года до $T = 10,7$ лет на фоне основного периода $T = 62$ года. В ряду температур – это короткие периоды от $T = 1,9$ года до $T = 5,2$ лет на фоне длинного периода $T = 63$ года. В ряду с осадками к корот-

ким периодам от $T = 2,2$ лет до $8,7$ лет добавляется длинный период $T = 20,1$ года.

При использовании восьми гармоник значительно вырастает качество моделей: для селей $R^2 = 0,645$, для осадков $R^2 = 0,653$, для температур $R^2 = 0,829$.

Таким образом, выявленные длиннопериодические колебания у селей и температур связаны со значительными и нелинейными изменениями в элементах этих рядов в течении исследуемого периода. В отличие от этих рядов, в ряду осадков наиболее значимыми являются короткопериодические изменения ($T = 4$ года) на фоне колебания с периодом $T = 20,1$ года, что формирует медленные синусоидальные изменения режима осадков.

Список источников

1. Докукин М. Д., Беккиев М. Ю., Калов Р. Х., Шагин С. И. Зоны поражения селевыми потоками 1967 года в долине реки Баксан (Центральный Кавказ) // Природообустройство. 2023. № 1. С. 102–107.
2. Мальнева И. В., Докукин М. Д., Калов Р. Х., Акаев А. Р. Селевой поток в урочище Джилы-Су (Северное Приэльбрусье) 4 октября 2022 г.: причины и факторы // Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях. Материалы Общероссийской научно-практической конференции. М.: Геомаркетинг, 2023. С. 111–118.
3. Malneva I. V., Kononova N. K. The activity of mudflow processes in mountains of Russia and adjacent countries in 20 century. International Symposium on Latest Natural Disasters (September 5–8, 2005. Sofia, Bulgaria). CD. Topic VI. Case studies. Conclusions and recommendations. Sofia, 2005. P. 787–800.
4. Кюль Е. В., Гедуева М. М., Атаев З. В. Селевая активность в бассейне реки Самур (Восточный Кавказ) по результатам мониторинга 2020 года // Известия ДГПУ. Т. 15. № 1. 2021. С. 73–88.
5. Беккиев М. Ю., Докукин М. Д., Калов Р. Х., Ташилова А. А. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 8. № 3. С. 57–80.

6. Ташилова А. А., Федченко Л. М., Залиханов М. Ч, Кондратьева Н. В. Анализ динамики селей на фоне климатических изменений в высокогорной зоне Кабардино-Балкарии // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 1. С. 71–90. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.1.4>
7. Дворецкая И. В., Крученицкий Г. М., Матвиенко Г. Г., Станевич И. И. Астрономические факторы в долговременной эволюции климата Земли // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 2. С. 139–149.
8. Статников К. А., Крученицкий Г. М. Статистическое моделирование глобальной тектонической активности и некоторые физические следствия из его результатов // Пространство и Время. 2015. № 1–2(19–20). С. 314–317.
9. Ашабоков Б. А., Кешева Л. А., Крученицкий Г. М., Ташилова А. А., Шокуев Р. А. Моделирование сезонной и долговременной изменчивости снежного покрова Южного федерального округа России // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 662. С. 22–25.
10. Мальнева И. В., Кононова Н. К. Активность селей на территории России и ближнего зарубежья в XXI веке // Геоиск. 2012. № 4. С. 48–56.
11. Кондратьева Н. В. Распространение и особенности проявления селевых процессов на северном и юго-западном склонах Большого Кавказа: дис. ... д-ра геогр. наук: 25.00.23 / Кондратьева Наталия Владимировна. Нальчик, 2018. 402 с.
12. Hammer O., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologic Electronica 2014. No. 1. P. 9.
13. Справочник по прикладной статистике / под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю. Н. Тюрина. Т. 1. М.: Финансы и статистика, 1989. 510 с.
14. Hirotsugu A. A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control 1974. No. 6. P. 716–723.

References

1. Dokukin MD, Bekkiev MYu, Kalov RKh, Shagin SI. Zones affected by mudflows in 1967 in the Baksan River valley (Central Caucasus). Nature Management. 2023;(1):102-107. (In Russ.).

2. Malneva IV, Dokukin MD, Kalov RKh, Akaev AR. Mudflow in the Djily-Su tract (Northern Elbrus region) October 4, 2022: causes and factors. Study of hazardous natural processes and geotechnical monitoring during engineering surveys. In Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. M.: Geomarketing LLC; 2023. P. 111–118. (In Russ.).
3. Malneva IV, Kononova NK. The activity of mudflow processes in mountains of Russia and adjacent countries in 20 century. In International Symposium on Latest Natural Disasters (September 5–8, 2005. Sofia, Bulgaria). CD. Topic VI. Case studies. Conclusions and recommendations. Sofia; 2005. P. 787-800.
4. Kul EV, Gedueva MM, Ataev ZV. Mudflow activity in the Samur River basin (Eastern Caucasus) based on monitoring results in 2020. News of the DSPU. 2021;15(1):73-88. (In Russ.).
5. Bekkiev MYu, Dokukin MD, Kalov RKh, Tashilova AA. Modern degradation of valley glaciers of the Central Caucasus. Fundamental and applied climatology. 2021;8(3):57-80. (In Russ.).
6. Tashilova AA, Fedchenko LM, Zalikhanov MCh, Kondratyeva NV. Analysis of the dynamics of mudflows against the background of climate change in the high-mountain zone of Kabardino-Balkaria. Science. Innovations. Technologies. 2024;(1):71-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.1.4>
7. Dvoretzskaya IV, Kruchenitsky GM, Matvienko GG, Stanovich II. Astronomical factors in the long-term evolution of the Earth's climate. Optics of the atmosphere and ocean. 2014;27(2):139-149. (In Russ.).
8. Statnikov KA, Kruchenitsky GM. Statistical modeling of global tectonic activity and some physical consequences of its results. Space and time. 2015;1-2(19-20): 314-317. (In Russ.).
9. Ashabokov BA, Kesheva LA, Kruchenitsky GM, Tashilova AA, Shokuev RA. Modeling of seasonal and long-term variability of snow cover in the Southern Federal District of Russia. In Proceedings of the A.F. Military Space Academy Mozhaisky. 2018;(662):22-25. (In Russ.).
10. Malneva IV, Kononova NK. Mudflow activity in Russia and neighboring countries in the 21st century. Georisk. 2012;(4):48-56. (In Russ.).
11. Kondratyeva NV. Distribution and features of mudflow processes on the northern and southwestern slopes of the Great-

- er Caucasus. Dis. dr. geogr. sciences: 25.00.23. Kondratyeva Nataliya Vladimirovna. Nalchik; 2018. 402 p. (In Russ.).
12. Hammer Ø, Harper DAT, Ryan PD. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. Palaeontologic Electronica. 2014;4(1):9.
 13. Handbook of Applied Statistics. Ed. By E. Lloyd, W. Lederman, YuN Tyurin. M.: Finance and Statistics; 1989. Vol. 1. 51 p.
 14. Hirotagu A. A new look at the statistical model identification. IEEE Transactions on Automatic Control. 1974;19(6):716-723.

Информация об авторах

Борис Азреталиевич Ашабоков — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков Высокогорного геофизического института, заведующий отделом Института информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН, Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015_

Алла Амарбиевна Ташилова — доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015_

Лара Асировна Кешева — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории атмосферных конвективных явлений Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015

Наталия Вячеславовна Теунова — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015_

Вклад авторов: все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации статьи.

Information about the authors

Boris A. Ashabokov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Cloud Physics, High-Mountain Geophysical Institute, Head of Department at the Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015

Alla A. Tashilova — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Senior Research Associate at the Laboratory of Cloud Microphysics, High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015

Lara A. Kesheva — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher at the Laboratory of Atmospheric Convective Phenomena, High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015

Nataliya V. Teunova — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics, High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.