

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО И ПОДЗЕМНОГО СТОКА РЕК БОЛЬШОГО КАВКАЗА

*И.С. Алиева*

Бакинский государственный университет, Баку, Азербайджан, aliyeva-1958@list.ru

Выполнен анализ статистической структуры рядов, оценена степень синхронности колебаний стоковых характеристик, выявлены линейные тренды. Оценка значимости линейных трендов выполнена по значениям коэффициента парной корреляции и его стандартной ошибке. Установлено, что стационарность большей части рассматриваемых рядов нарушена по дисперсии или среднему значению. Выявлено, что за многолетний период наблюдений подземный сток подавляющего большинства рек увеличивается. Для рядов поверхностного стока обнаружены разнонаправленные тренды. Большинство линейных трендов подземного стока и половина трендов поверхностного стока являются статистически значимыми. Использованы ряды данных о стоке 17 гидрологических пунктов за период с 1934 по 2017 г.

*Ключевые слова:* Большой Кавказ, подземный сток, поверхностный сток, многолетние колебания, стационарность рядов, коэффициент автокорреляции, линейный тренд.

## SPATIAL-TEMPORARY REGULARITIES OF THE SURFACE AND UNDERGROUND FLOWS OF THE RIVERS OF THE GREAT CAUCASUS

*I.S. Alieva*

Baku State University, Baku, Azerbaijan

The analysis of the statistical structure of the ranges is carried out, the degree of synchronism of fluctuations in runoff characteristics is estimated, and linear trends are identified. The annual values of groundwater runoff have been determined as the arithmetic average of the monthly average minimum winter and summer-autumn water discharges, the surface runoff being calculated as the difference between the annual and groundwater runoff. The stationarity of most of the considered ranges proves to be violated by dispersion or average value. For underground runoff, the number of such ranges according to the Fisher and student criteria is 9 and 12, and for surface runoff, 7 and 9, respectively. For 15 rows of underground runoff and 9 rows of surface runoff, autocorrelation coefficients are statistically significant at a 5 % level of significance. Differential integral curves have been drawn according to the data of each river, the temporal indicators of various phases of water content being determined from them. For the long-term, fluctuations of the underground flow of all the studied rivers are characterized by the presence of a prolonged low-water phase. To quantify the degree of synchronism of long-term fluctuations in the underground flow of rivers, the pair correlation coefficients between all the analyzed series have been calculated. In the long-term fluctuations of both the underground and surface runoff of the rivers of the Greater Caucasus, asynchrony has not been detected. Over the long-term observation period, the underground runoff of the vast majority of rivers is shown to be increasing. For ranges of surface runoff, multidirectional trends have been found. Most of the linear trends in groundwater flow and half of the trends in surface runoff are statistically significant. The significance of

linear trends has been estimated by the values of the pair correlation coefficient and its standard error. The data on the runoff of 17 hydrological observation points covering 1934—2017 period have been used.

*Keywords:* Greater Caucasus, underground runoff, surface runoff, long-term fluctuations, stationarity of series, autocorrelation coefficient, linear trend.

---

**For citation:** *Alieva I.S.* Spatial-temporary regularities of the surface and underground flows of the rivers of the Great Caucasus. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2020. 58: 41—48. [In Russian]. doi: 10.33933/2074-2762-2020-58-41-48

---

## Введение

Многолетние колебания речного стока происходят под совместным влиянием природных и антропогенных факторов. Среди природных факторов следует особо отметить роль атмосферных осадков и температурного режима воздуха. В зависимости от степени изменения этих двух климатических факторов стационарность рядов стока может нарушаться. В условиях изменяющегося климата во всех регионах земного шара, включая территорию Азербайджана, наблюдается нарушение стационарности значительной части рядов стока [1—5].

В наиболее обжитых районах земного шара к настоящему времени уже не осталось сколько-нибудь крупных речных систем с режимом, не нарушенным в той или иной степени деятельностью человека [2]. Учитывая это, в настоящей статье рассмотрены ряды данных о поверхностном и подземном стоке рек Большого Кавказа, которые имеют естественный или же условно естественный режим. Ежегодные значения подземного стока были определены как средние арифметические значения среднемесячных минимальных зимних и летне-осенних расходов воды [6]. В настоящее время влияние антропогенных факторов на минимальный зимний сток не только рек Большого Кавказа, но и всех рек Азербайджана практически отсутствует [4, 7, 8]. Минимальные летне-осенние расходы воды рассматриваемых рек характеризуют естественный их режим, поскольку выше пунктов наблюдений водозабор для хозяйственных нужд отсутствует.

В случае отсутствия или слабого антропогенного влияния на реку и ее бассейн многолетние колебания речного стока рассматриваются как вероятностный (стохастический) процесс [9, 10]. Такой подход возможен по нескольким причинам. Крупномасштабная турбулентность в атмосфере обуславливает вероятностные изменения гидрологических характеристик и процессов [11]. Другая причина стохастической природы многолетних колебаний речного стока связана с их многофакторностью. Например, на формирование речного стока влияют климатические факторы, геологическое строение и гидрогеологические особенности бассейна, а также озера, ледники, различные типы ландшафтов и антропогенные факторы. Информация о влиянии каждого из этих многочисленных факторов ограничена, и их совместное влияние имеет случайный характер [9]. Вышесказанное свидетельствует о возможности и эффективности применения теории вероятности при описании многолетних колебаний расходов воды [12].

Цель статьи заключается в анализе статистической структуры рядов поверхностного и подземного стока рек Большого Кавказа.

### Материалы и методы исследования

В настоящей работе были проанализированы ряды данных о поверхностном и подземном стоке за период 1934—2017 гг. 17 гидрологических постов, действующих на реках Большого Кавказа. Годовые значения подземного стока были определены как средние арифметические значения среднемесячных минимальных зимних и летне-осенних расходов воды [6], а значения поверхностного стока рассчитаны как разность между годовым и подземным стоком. Стационарность рядов наблюдений оценена по критериям Фишера и Стьюдента, рассчитаны значения коэффициента автокорреляции. Анализ синхронных колебаний поверхностного и подземного стока рек выполнен с применением разностных интегральных кривых и методом корреляции. Значимость линейных трендов оценена по коэффициенту парной корреляции ( $R$ ) с учетом его средней квадратичной ошибки ( $\sigma_R$ ). При выполнении условия  $R/\sigma_R \geq 2$  тренд принимался статистически значимым на 5 %-ном уровне [9, 13].

### Обсуждение результатов

**Анализ статистической структуры рядов. Подземный сток.** Установлено, что большинство рядов подземного стока являются неоднородными. Число таких рядов по критериям Фишера и Стьюдента составляет 9 и 12 соответственно. Девять рядов являются неоднородными как по среднему значению, так и по дисперсии. Все коэффициенты автокорреляции являются положительными и изменяются в пределах от 0,027 до 0,830. Самые высокие значения этих коэффициентов характерны для притоков трансграничной реки Ганых (Алазани). Для 15 рядов коэффициенты автокорреляции являются статистически значимыми на 5 %-ном уровне. Это объясняется высокой инерционностью подземных вод.

**Поверхностный сток.** Почти половина рядов поверхностного стока являются неоднородными: семь рядов по критерию Фишера и девять по критерию Стьюдента. Три ряда являются неоднородными как по среднему значению, так и по дисперсии. По обоим критериям четыре ряда являются однородными. Таким образом, для 13 из 17 анализируемых рядов гипотеза о стационарности отвергается как минимум по одному из применяемых критериев.

Коэффициенты автокорреляции рядов поверхностного стока изменяются в пределах от  $-0,158$  до  $0,610$  и для половины рядов (девять рядов) эти коэффициенты являются статистически значимыми.

**Анализ синхронности рядов стока. Подземный сток.** По данным для каждой реки были построены разностные интегральные кривые, и по ним были определены временные показатели (начало, конец и продолжительность) фаз различной водности (многоводная, маловодная и средневодная фазы). Обычно на фоне продолжительных фаз конкретной водности встречается несколько лет (один — три года) другой водности. Для выявления общих закономерностей временных показателей фаз различной водности такие короткие периоды не рассматривались. Полученные результаты представлены на рис. 1.

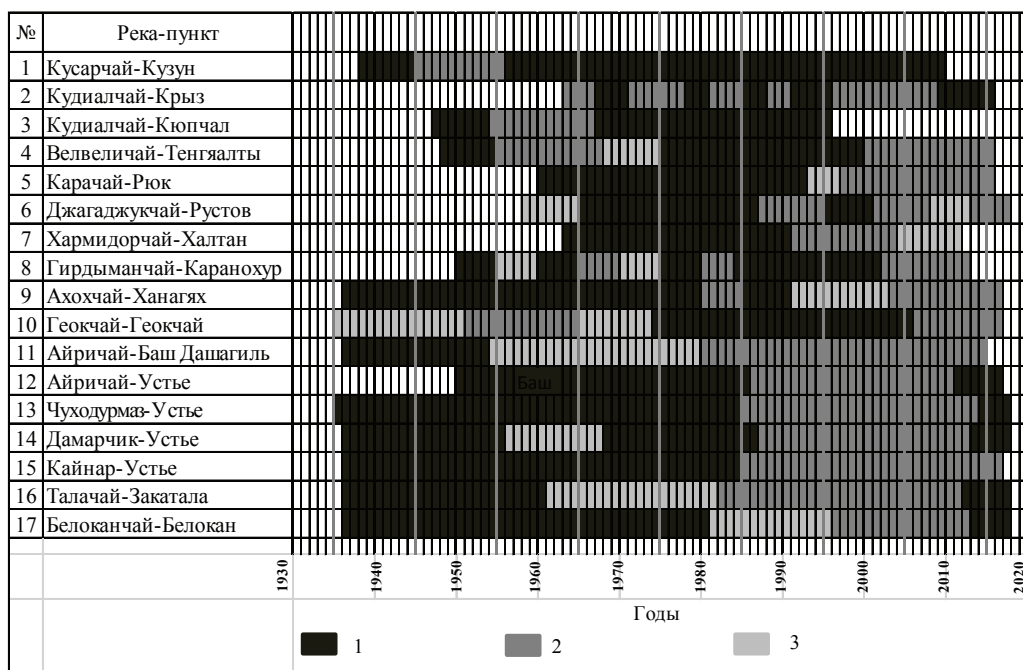


Рис. 1. Временные границы фаз с различной водностью в рядах подземного стока.

1 — маловодная фаза, 2 — средневодная фаза, 3 — многоводная фаза.

Fig. 1. Temporal boundaries of phases with different water content in the rows of underground runoff.

1 — low-water phase, 2 — medium-water phase, 3 — high-water phase.

Как видно на рис. 1, для большинства рассматриваемых рек отчетливо выделяются все фазы различной водности, однако они различаются по продолжительности. В целом для многолетних колебаний подземного стока всех рек Большого Кавказа характерно наличие продолжительной маловодной фазы. По-видимому, это объясняется повышенной инерционностью подземных вод. Доля подземного питания рассматриваемых рек составляет 40—48 % [14].

Для количественной оценки степени синхронности многолетних колебаний подземного стока рек были вычислены коэффициенты парной корреляции  $r$  между всеми анализируемыми рядами. Для рек северо-восточного склона Большого Кавказа среднее значение коэффициента парной корреляции составляет 0,51, а для рек бассейна Ганых (Алазани) — 0,57. Степень синхронности колебаний подземного стока Ширванских рек еще слабее ( $r = 0,36$ ).

В многолетних колебаниях подземного стока рек Большого Кавказа асинхронность не выявлена. Все коэффициенты парной корреляции (всего 45) являются положительными.

*Поверхностный сток.* Разностные интегральные кривые поверхностного стока рек имеют более сложный вид. Из-за того что поверхностный сток является более изменчивым, в его рядах общее число фаз различной водности больше, а число продолжительных фаз меньше. Это затрудняет обобщение временных показателей фаз различной водности. Можно лишь отметить, что для большинства рек период после 2005—2010 гг. был маловодным.

Таким образом, по сравнению с многолетними колебаниями подземного стока синфазность поверхностного стока рек изучаемой территории выражена слабее. Этот вывод подтверждается результатами анализа коэффициентов парной корреляции. Среднее районное значение коэффициента парной корреляции для рек северо-восточного склона Большого Кавказа составляет 0,31, для рек Ширванской зоны — 0,29 и для рек бассейна Ганых (Алазани) — 0,23. В многолетних колебаниях поверхностного стока асинхронность также отсутствует.

*Анализ линейных трендов. Подземный сток.* Анализ линейных трендов рядов подземного стока рек показывает, что в общем в многолетнем разрезе наблюдается увеличение значений рассматриваемой характеристики стока (рис. 2). Число таких рядов составляет 14, и для 13 из них линейные тренды являются статистически значимыми, а для одного незначимым. В остальных трех рядах тренд отсутствует. Отрицательных трендов также нет.

Вполне вероятно, что увеличение подземного стока рек Большого Кавказа в последние несколько десятилетий связано с изменением климата. Выше уже отмечалось, что годовые значения подземного стока были вычислены по минимальным зимним и летне-осенним расходам воды. Многочисленные исследования,

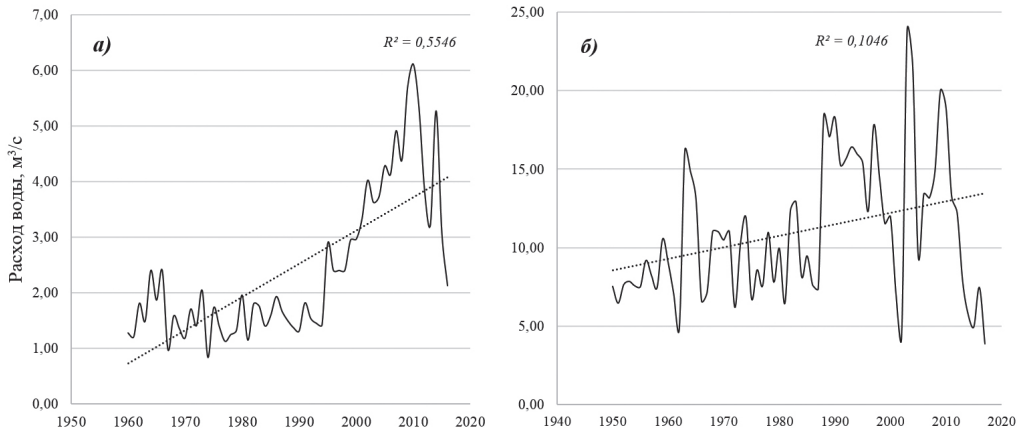


Рис. 2. Динамика изменения подземного стока рек Большого Кавказа.

а) р. Айричай — п. Устье (тренд значим), б) р. Карачай — п. Рюк (тренд значим).

Fig. 2. Dynamics of changes in the underground runoff of the rivers of the Greater Caucasus.

а) r. Ayrychay — st. Mouth (the trend is significant), б) r. Karachay — st. Ryuk (the trend is significant).

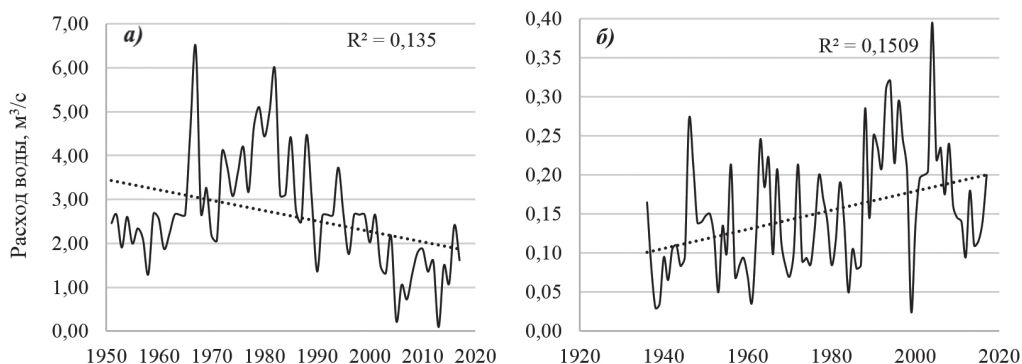


Рис. 3. Динамика изменения поверхностного стока рек Большого Кавказа.

а) р. Гирдиманчай — п. Каранохур (тренд значим), б) р. Кайнар — п. Устье (тренд значим).

Fig. 3. Dynamics of changes in surface runoff of the rivers of the Greater Caucasus.

а) г. Girdimanchay — st. Karanohur (the trend is significant),

б) г. Kaynar — st. Mouth (the trend is significant).

выполненные в различных регионах земного шара, показывают, что в условиях изменения климата в бассейнах рек, где осадки выпадают в основном в виде снега, режим рек изменился, точнее, изменились временные границы фаз водного режима. Вследствие повышения температуры воздуха в зимний период большую часть осадков составляют дожди, и по сравнению с предыдущим периодом снег начинает таять на одну-две недели раньше [1, 15, 16]. Однако влияние этого обстоятельства на летний сток рек очень слабое [16]. Следует отметить, что после 1990—1995 гг. значение и изменчивость подземного стока резко возросли, но последние годы (2013—2017 гг.) являются маловодными (см. рис. 2).

*Поверхностный сток.* Характер линейных трендов рядов поверхностного стока рек отличается от трендов подземного стока. Из 17 пунктов в шести поверхностный сток увеличивается, в шести уменьшается, а в пяти изменения отсутствуют. Для девяти рядов тренды являются статистически значимыми. Линейные тренды для двух рек представлены на рис. 3.

## Выводы

Анализ статистической структуры рядов поверхностного и подземного стока рек Большого Кавказа показывает, что однородность основной части анализируемых рядов стока нарушена по среднему значению или по дисперсии. Рассмотренные ряды характеризуются высокой автокорреляцией, особенно ряды подземного стока. Уровень синфазности и синхронности в многолетних колебаниях подземного стока рек выше, чем для поверхностного стока. Это связано с тем, что подземный сток рек характеризуется повышенной инерционностью, а изменчивость поверхностного стока более высокая. Анализ корреляционных матриц показал, что возможности парной корреляции для удлинения коротких рядов поверхностного

и подземного стока ограничены. Показано, что в многолетних колебаниях рассмотренных характеристик стока рек асинхронность отсутствует.

В многолетнем разрезе подземный сток подавляющего большинства рек увеличивается, а в рядах поверхностного стока выявлены разнонаправленные тренды. Большинство линейных трендов подземного стока и около половины трендов поверхностного стока являются статистически значимыми.

### Список литературы

1. Бейтс Б.К., Кунцевич З.В., У.С., Палютикоф Ж.П. (ред.). Изменение климата и водные ресурсы. Технический документ Межправительственной группы экспертов по изменению климата, Секретариат МГЭИК, Женева, 2008. 228 с.
2. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб: изд-во Государственного гидрологического института, 2008. 600 с.
3. Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЭОС, 2012. 736 с.
4. Иманов Ф.А., Гасанова Н.И., Агаев З.Б. Многолетние колебания стока рек Азербайджана // Вопросы географии. 2018. № 145. Гидрологические изменения. С. 277—284.
5. Махмудов Р.Н. Современные изменения климата и опасные гидрометеорологические явления. Баку: НАА, 2018. 232 с. (на азерб. языке).
6. Иманов Ф.А., Алиева И.С. Метод оценки ежегодных величин подземного стока в реки Большого Кавказа // Водные проблемы: наука и технологии. 2018. № 2 (12). С. 17—26 (на азерб. языке).
7. Иманов Ф.А. Минимальный сток рек Кавказа. Баку: Нафта-Пресс, 2000. 298 с.
8. Иманов Ф.А., Алакбаров А.Б. Современные изменения водных ресурсов Азербайджана и их интегрированное управление. Баку: Мутарджим, 2017. 352 с. (на азерб. языке).
9. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб: изд. РГГМУ, 2007. 279 с.
10. David A. Chin. Water-resources Engineering (second edition). USA, New Jersey: Pearson Education International, 2006. 572 p.
11. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты. М.: изд-во МГУ, 1990. 304 с.
12. Калинин Г.П. Проблемы глобальной гидрологии. Л.: Гидрометеоздат, 1968. 377 с.
13. Karatouz M., Ahmadi A., Akhbari M. Groundwater hydrology: Engineering, Planning, and Management. CRC Press. 2011. 634 p.
14. Рустамов С.Г., Каишай П.М. Водный баланс Азербайджанской ССР. Баку: Элм, 1978. 110 с.
15. Hodgkins G.A., Dudley R.W., Huntington T.G. Changes in the timing of high river flows in New England over the 20th century // J. Hydrol. 2003. 278 (1—4). P. 244—252.
16. Hodgkins G.A., Dudley R.W., Huntington T.G. Summer low flows in New England during the 20th century // J. Amer. Water Res. Assoc. 2005. 41(2). P. 403—412.

### References

1. Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S., Palutikof J.P. Eds. *Izmeneniye klimata vodniye resursi*. Climate Change and Water. Technical Paper. IPCC Secretariat. Geneva, 2008: 228 p. [In Russian].
2. *Vodniye resursi Rossii i ix ispolzovaniye*. Water resources of Russia and their use. Ed. prof. I.A. Shiklomanov. SPb: State Hydrological Institute, 2008: 600 p. [In Russian].
3. *Zakonomernosti gidrologicheskix prosessov*. Patterns of hydrological processes. Ed. N.I. Alekseyevskiy. Moscow: GEOS, 2012: 736 p. [In Russian].
4. Imanov F.A., Gasanova N.I., Agayev Z.B. Long-term fluctuations of river flow in Azerbaijan. *Voprosi geografii. Gidrologicheskiye izmeneniya*. Problems of Geography. Hydrological Changes. 2018, 145:277—284. [In Russian].
5. Mahmudov R.N. *Sovremenniy izmeneniya klimata i opasniye gidrometeorologicheskiye yavleniya*. Modern climate change and dangerous hydrometeorological phenomena. Baku: NAA, 2018. 232 p. [In Azerbaijani].



6. *Imanov F.A., Aliyeva I.S.* Method for estimating annual underground flow in the rivers of the Greater Caucasus. *Vodnye problemi: nauka i texnologii*. Water problems: science and technology. 2018, 12 (2): 17–26. [In Azerbaijani].
7. *Imanov F.A.* *Minimalniy stok rek Kavkaza*. The minimum flow of the rivers of the Caucasus. Baku: Publishing House Nafta-Press, 2000. 298 p. [In Russian].
8. *Imanov F.A., Alakbarov A.B.* *Sovremenniy izmeneniya vodnix resursov Azerbaydjana i ix integrirovannoye upravleniye*. Modern changes in water resources of Azerbaijan and their integrated management. Baku: Publishing house Mutarjim, 2017. 352 p. [In Azerbaijani].
9. *Sikan A.V.* *Metodi statisticheskoy obrabotki gidrometeorologicheskoy informatsii*. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. SPb: RSHU, 2007. 279 p. [In Russian].
10. *David A. Chin.* *Water-resources Engineering* (second edition). Pearson education International, USA, New Jersey, 2006. 572 p.
11. *Yevstigneyev V.M.* *Rechnoy stok i gidrologicheskiye rascheti*. River runoff and hydrological calculations. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1990: 304 p. [In Russian].
12. *Kalinin G.P.* *Problemi globalnoy gidrologii*. Problems of global hydrology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1968. 377 p. [In Russian].
13. *Karamouz M., Ahmadi A., Akhbari M.* *Groundwater hydrology: Engineering, Planning, and Management*. CRC Press. 2011: 634 p.
14. *Rustamov S.H., Kashkay R.M.* *Vodniy balans Azerbaydjanskoj SSR*. Water balance of the Azerbaijan SSR. Baku: Publishing House Elm, 1978. 110 p. [In Russian].
15. *Hodgkins G.A., Dudley R.W., Huntington T.G.* Changes in the timing of high river flows in New England over the 20th century. *J. Hydrology*, 2003, 278 (1–4): 244–252.
16. *Hodgkins G.A., Dudley R.W., Huntington T.G.* Summer low flows in New England during the 20th century. *J. Amer. Water Resources Assoc.*, 41(2), 2005: 403–412.

*Статья поступила 22.01.2020*

*Принята после доработки в печать 05.03.2020*

### ***Сведения об авторе***

*Алиева Ирада Сабир кызы*, канд. геогр. наук, доцент, доцент кафедры гидрометеорологии Бакинского государственного университета, e-mail: aliyeva-1958@list.ru

### ***Information about author***

*Aliyeva Irada Sabir kizi*, PhD (Geogr.), Associate Professor, Baku State University, Department of Hydrometeorology