

## **ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ОСАДКИ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ И РЕСПУБЛИКИ АБХАЗИЯ**

**Ахсалба Асида Константиновна  
к.ф.-м.н., доц. Абхазского госуниверситета,  
нач. отдела Гидрометеорологического  
и экологического мониторинга ИЭ АНА**

Атмосферные осадки являются одной из важнейших метеорологических элементов, оказывающих влияние на деятельность человека и на окружающую среду .

Атмосферными осадками называется влага, выпавшая на поверхность из атмосферы в виде дождя, мороси, крупы, снега, града. Осадки выпадают из облаков, но не каждое облако дает осадки. Формирование осадков из облака идет за счет укрупнения капель до размеров, способных преодолеть восходящие токи и сопротивление воздуха. Укрупнение капель идет за счет слияния капель, испарения влаги с поверхности капель (кристаллов) и конденсации водяного пара на других.

#### **Виды осадков:**

Обложные осадки – равномерные, длительные по продолжительности, выпадают из слоисто-дождевых облаков;

Ливневые осадки – характеризуются быстрым изменением интенсивности и непродолжительностью. Они выпадают из кучево-дождевых облаков в виде дождя, нередко с градом.

Морозящие осадки – в виде мороси выпадают из слоистых и слоисто-кучевых облаков.

*По происхождению различают:*

*Конвективные осадки* характерны для жаркого пояса, где интенсивны нагрев и испарение, но летом нередко бывают и в умеренном поясе.

*Фронтальные осадки* образуются при встрече двух воздушных масс с разной температурой и иными физическими свойствами, выпадают из более теплого воздуха, образующего циклонические вихри, типичны для умеренного и холодного поясов.

*Орографические осадки* выпадают на наветренных склонах гор, особенно высоких. Они обильны, если воздух идет со стороны теплого моря и обладает большой абсолютной и относительной влажностью.

**Цель исследования** – сравнение максимальных осадков суточных, месячных и годовых сумм осадков за период 1984 -2017 гг. с использованием инструментальных данных Абхазии, Адлера, Сочи и автоматизированной станции VENTAGE PRO-2 на метеорологической станции «Сухумский Маяк».

**Методы исследования.** Исследование полученных временных рядов проводилось методами статистического анализа: рассчитывались средние, максимальные, годовые суммы атмосферных осадков, строились графики многолетнего хода, определялись линейные тренды.

Согласно объективной позиции, озвученной в руководстве Всемирной Метеорологической Организации по анализу экстремальных событий (Klein Tank et al., 2009) и принятой за основу в соответствующем докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2013), исследование климатических изменений в статистике возникновения экстремальных событий, следует проводить на основе анализа гидрометеорологических параметров редкой повторяемости. Очевидно, что систематическое изменение в статистике гидрометеорологических величин в экстремальной области может сопровождаться и увеличением числа опасных явлений со значительным воздействием на экосистемы отдельных регионов и общественное благосостояние (Klein Tank et al., 2009).

Опасные метеорологические явления – атмосферные явления, которые классифицируются: по происхождению; по характеру воздействия; по продолжительности (времени действия); по регулярности действия; по масштабам распространения; по группам, типам и видам.

Экстремальное количество и продолжительность выпадения осадков оказываются опасными для людей и различных объектов и возбуждают другие виды чрезвычайных ситуаций:

- интенсивные снегопады парализуют транспорт, вызывают повреждения деревьев, ЛЭП, зданий под снеговой нагрузкой, сход снежных лавин в горах, а при выпадении в обычно бесснежных районах или в теплое время года приносят ущерб сельскому хозяйству;
- интенсивные ливни возбуждают наводнения, эрозию, сели и оползни в горах; несвоевременные и затяжные дожди вредоносны для урожая;
- экстремально малые суммы осадков приводят к засухе, опасности лесных пожаров, обмелению рек и т. д.

Ущерб от опасных метеорологических явлений продолжает расти. Особенно сильно, примерно в 10 раз, он возрос за вторую половину ушедшего века. По имеющимся расчетам, площадь паводкоопасных территорий составляет на Земном шаре примерно 3 млн. кв. км, на которых проживает около 1 миллиарда человек. Ежегодные убытки от наводнений в отдельные годы превышают 200 миллиардов долларов. Гибнут десятки и более тысяч людей. В большинстве районов Земного шара наводнения вызываются продолжительными, интенсивными дождями и ливнями в результате прохождения циклонов. Не исключением является и республика Абхазия.

**Погода — это основной фактор, от которого зависит безопасность человека в природных условиях.** Некоторые погодные явления существенно осложняют пребывание человека в природной среде.

**Опасные природные явления классифицируются:** по происхождению; по характеру воздействия; по продолжительности (времени действия); по регулярности действия; по масштабам распространения; по группам, типам и видам. **По характеру воздействия опасные природные процессы подразделяются на:**

- оказывающие преимущественно разрушительное действие (ураганы, тайфуны, смерчи, землетрясения, нашествие насекомых и т.д.);
- оказывающие преимущественно парализующее (останавливающее) действие для движения транспорта (снегопад, ливень с затоплением, гололед, туман);
- оказывающие истощающее воздействие (снижают урожай, плодородие почв, запас воды и других природных ресурсов);
- стихийные бедствия, способные вызывать техногенные аварии (природно-техногенные катастрофы) (молнии, гололед, обледенение, биохимическая коррозия).

**Некоторые явления могут быть многоплановые, например:** наводнение может быть разрушительным для города, парализующим – для затопления дорог и истощающим – для урожая.

**По продолжительности (времени действия) действия различают:**

- мгновенные (секунды, минуты) – шквалы, землетрясения;
- кратковременные (часы, дни) – атмосферные явления, паводки;
- долговременные (месяцы, годы) – вулканы, проблемы озоновых дыр;
- вековые (десятки, сотни лет) – климатические циклы, современное потепление климата

**К экстремальным природным явлениям относятся:** падение метеоритов, ураганы, тайфуны, смерчи, шквалы, землетрясения, наводнения, цунами, извержения вулканов, обвалы, камнепады, оползни, сели, водоснежные потоки, лавины.

**К неблагоприятным природным явлениям относятся** сильные морозы, засухи, эрозия почв и др.

**По регулярности действия во времени опасные природные явления можно разделить на:**

**регулярно (периодически) действующие.** Происходят практически в одни и те же сроки, а их сила может быть заблаговременно предсказана. Поэтому степень приспособленности к ним населения достаточно высокая;

**нерегулярно действующие,** т. е. возникающие в случайный момент времени. Время наступления таких экстремальных природных явлений как правило, заблаговременно не предсказывается, и потому они являются чрезвычайно опасными.

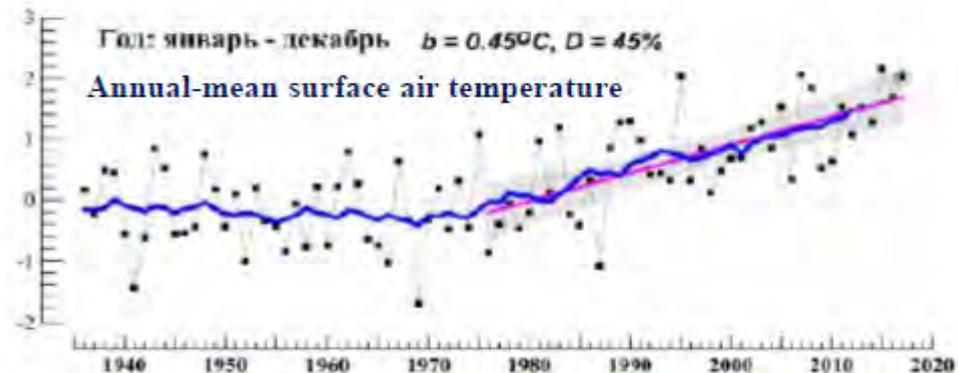
Ряд опасных природных явлений происходит в определенные сезоны (например, тропические циклоны — летом), но в пределах сезона возникают в случайный момент времени, предсказать который не всегда удается.

Современный климат характеризует высокие темпы изменения средних глобальных температур в значительной толще тропосферы и увеличение повторяемости опасных явлений погоды, которые наносят серьезный материальный ущерб обществу. Поэтому ресурсный подход к изучению климата и обеспечение гидрометеорологической безопасности – базовые условия в решении проблемы жизнеобеспечения в динамично устойчивом обществе.

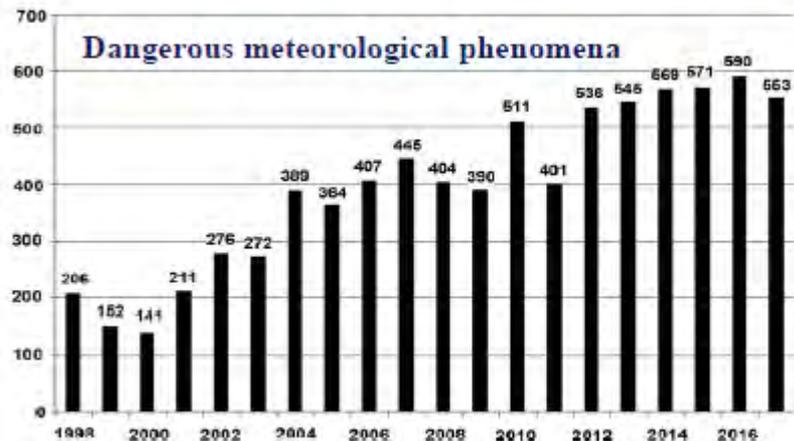
## Изменения приповерхностной температуры и количества опасных метеорологических явлений в России Changes in Russia

В связи с глобальным потеплением и эффектом полярного усиления в России по данным Росгидромета приповерхностная температура растет в последние десятилетия более чем вдвое быстрее глобальной.

При этом число опасных метеорологических явлений в России с конца 20 века увеличивается в среднем на 6-7% в год. (в 2017 г. в 4 раза больше, чем в 2000 г.)



Линейный тренд среднегодовой приповерхностной температуры в российских регионах для 1976-2017 гг. (К/10 лет)



Изменения числа опасных метеорологических явлений в России



Физико-географическая карта Абхазии.

## Автоматизированная станция Vantage pro-2

Многофункциональный метеорологический комплекс Davis Vantage Pro 2 предназначен как для профессионального, так и для бытового применения, и имеет функцию прогноза погоды, которая учитывает координаты места расположения комплекса, время года, текущее значение атмосферного давления и его изменение, скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха, количество осадков. Эти параметры измеряются датчиками, которыми укомплектован метеокomплекс.

Датчики метеокomплекса собраны в единый блок, что делает установку Davis Vantage Pro 2 очень простой.

Метеокomплексы Vantage Pro 2 выпускаются в проводном и беспроводном исполнении. Обе версии включают консоль управления и блок датчиков (сборник осадков, анемометр, датчики температуры и влажности воздуха). Все датчики расположены в одном корпусе, что облегчает установку и улучшает рабочие и эксплуатационные характеристики комплекса. В зависимости от назначения метеокomплекса, к базовой версии также можно добавить дополнительные консоли и / или одну или несколько специализированных станций.

### Особенности Vantage Pro 2:

- **Большой** дисплей.
- Интервал опроса датчиков от 2.5 секунд.
- Уникальный алгоритм прогноза погоды учитывает не только атмосферное давление, но и температуру, влажность, скорость и направление ветра, количество осадков, координаты места расположения метеокomплекса, время года.



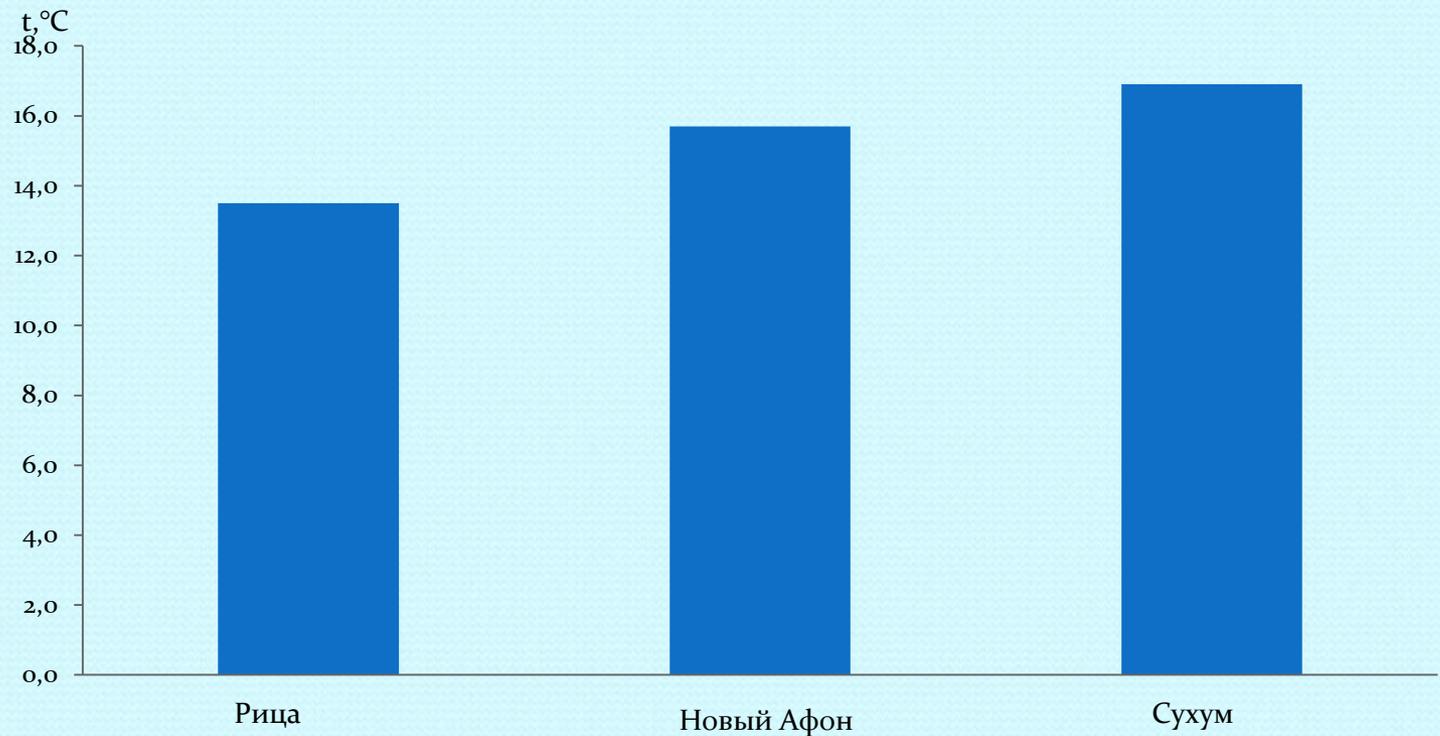
Автоматизированная станция Vantage pro-2 на гидрометеорологической станции «Сухумский Маяк».



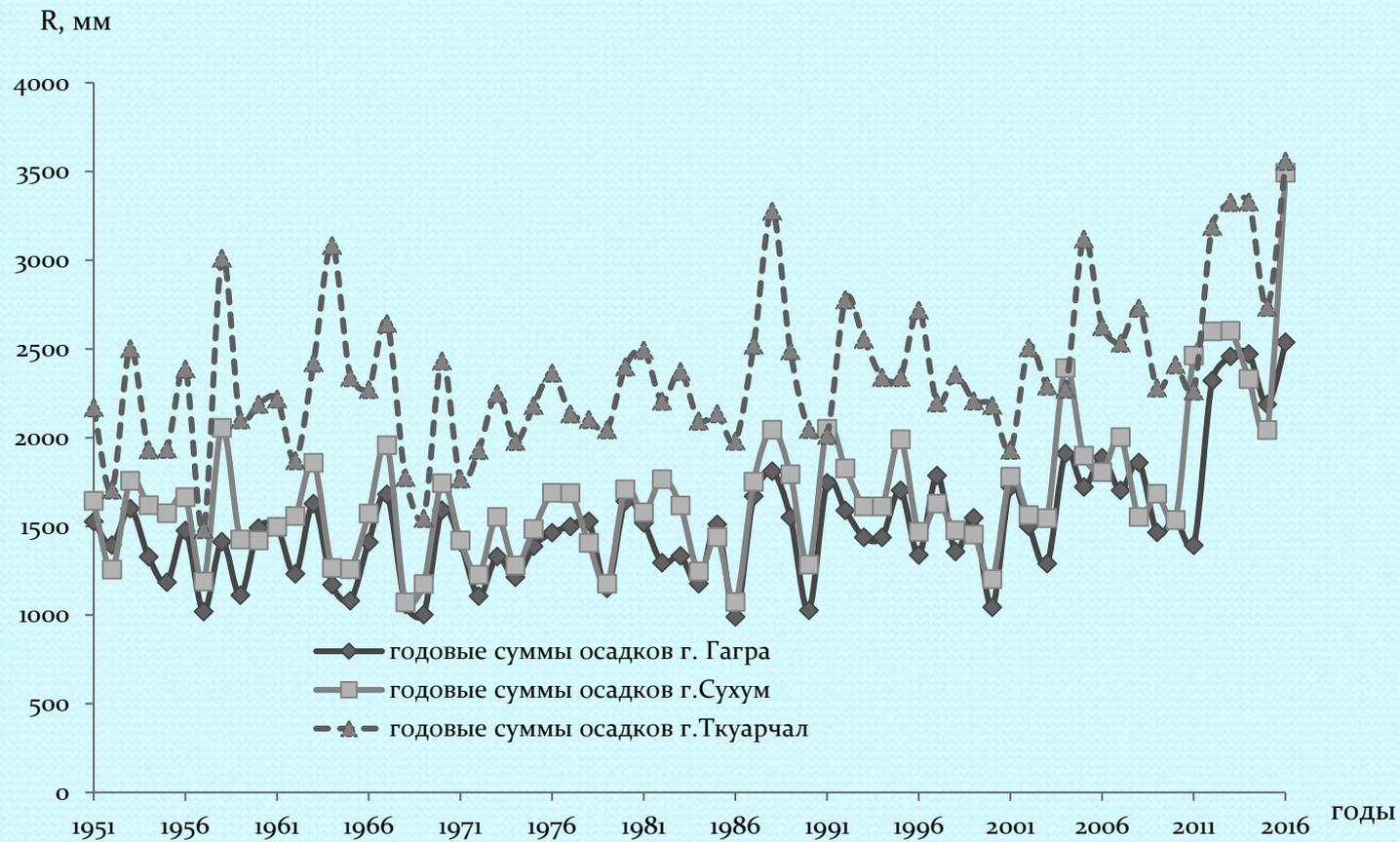
**Установка автоматической метеорологической станции серии Vantage Pro2 на смотровой площадке Новоафонской пещеры (снимок сделан в декабре 2017 года).**



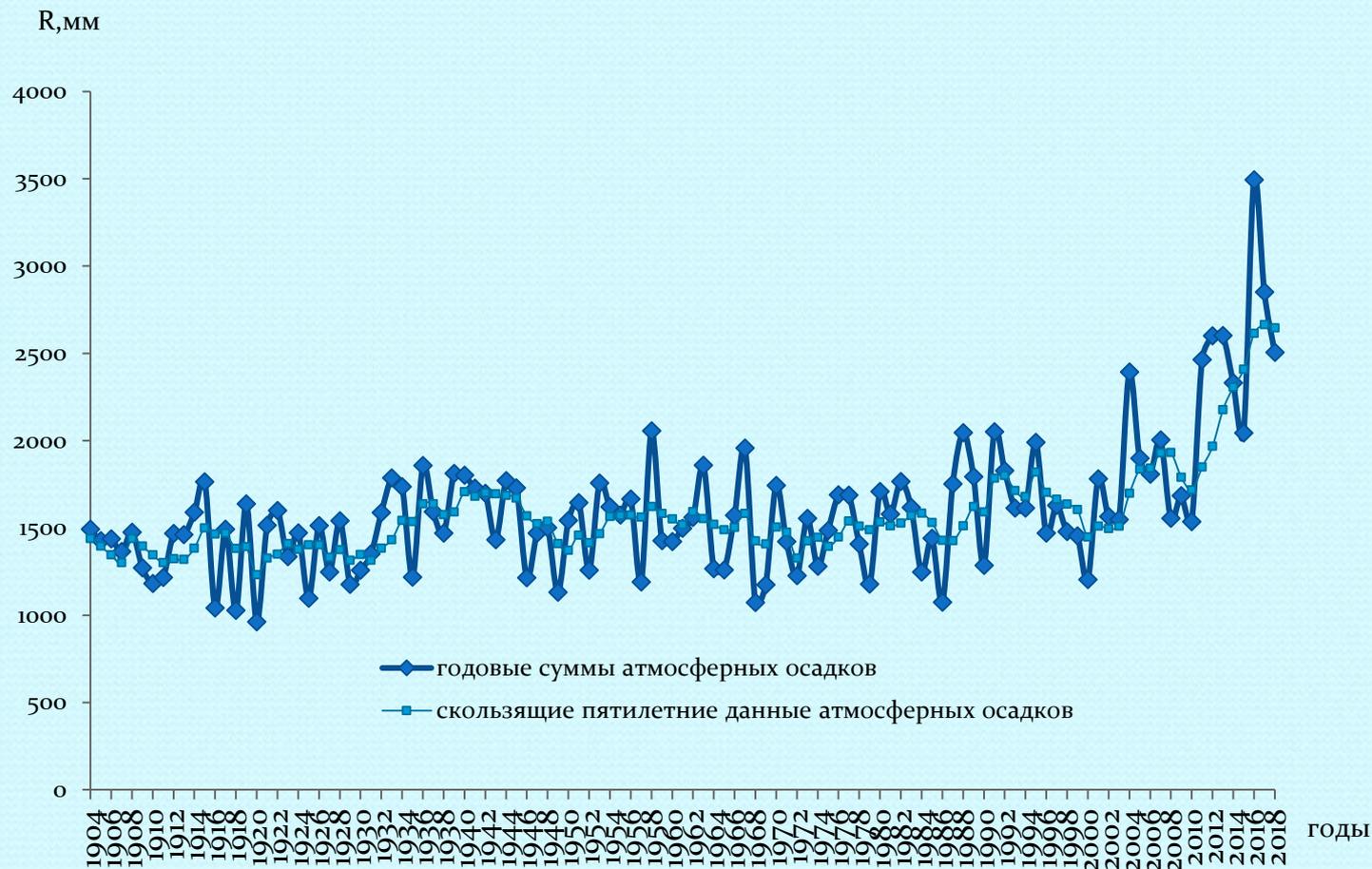
**Метеорологическая станция серии Vantage Pro2 на смотровой площадке оз. Рица (снимок сделан 5 апреля 2018 года).**



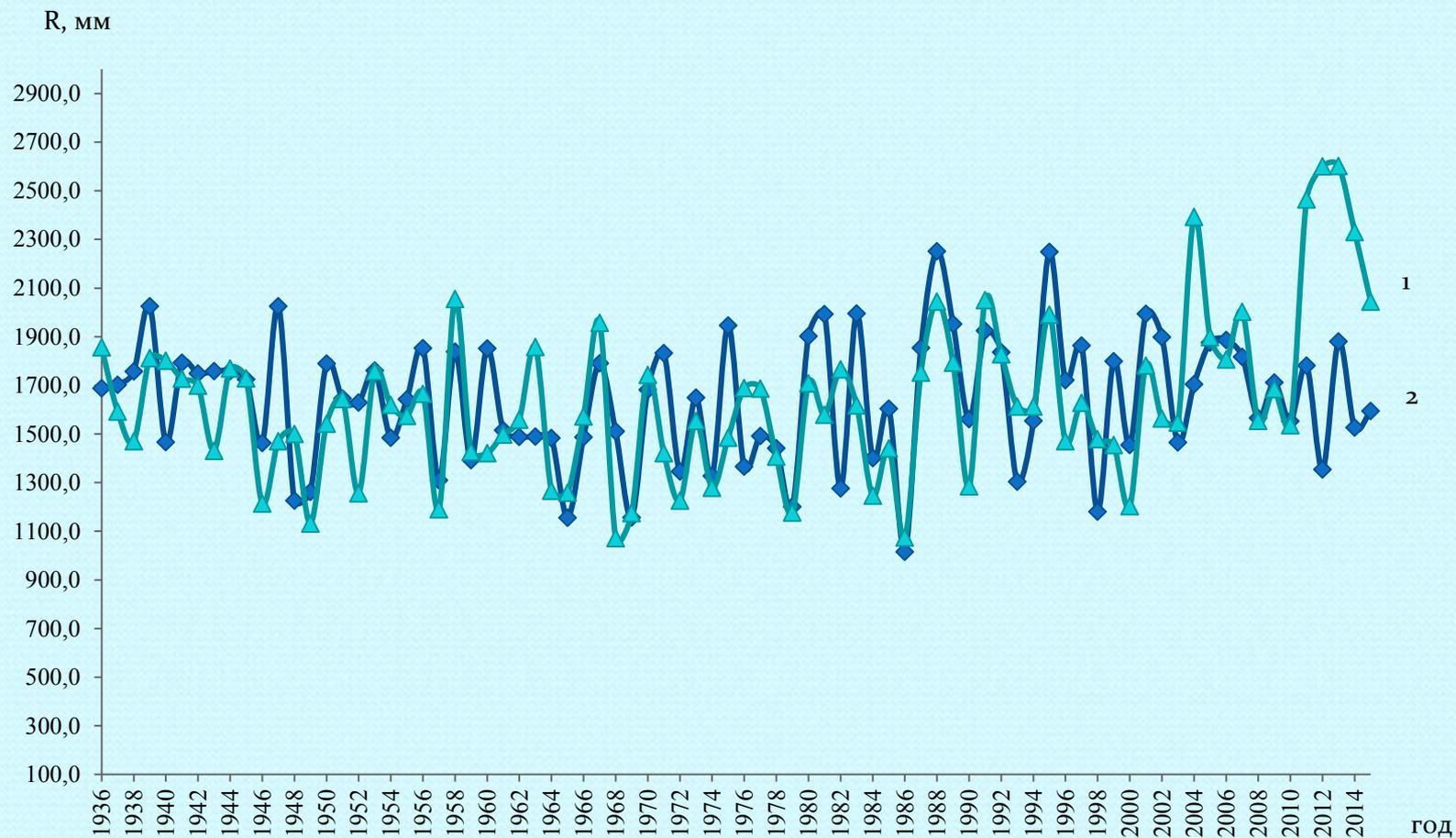
Среднегодовые значения температуры ПСВ за 2018 г. по данным метеорологических станций на территории Абхазии.



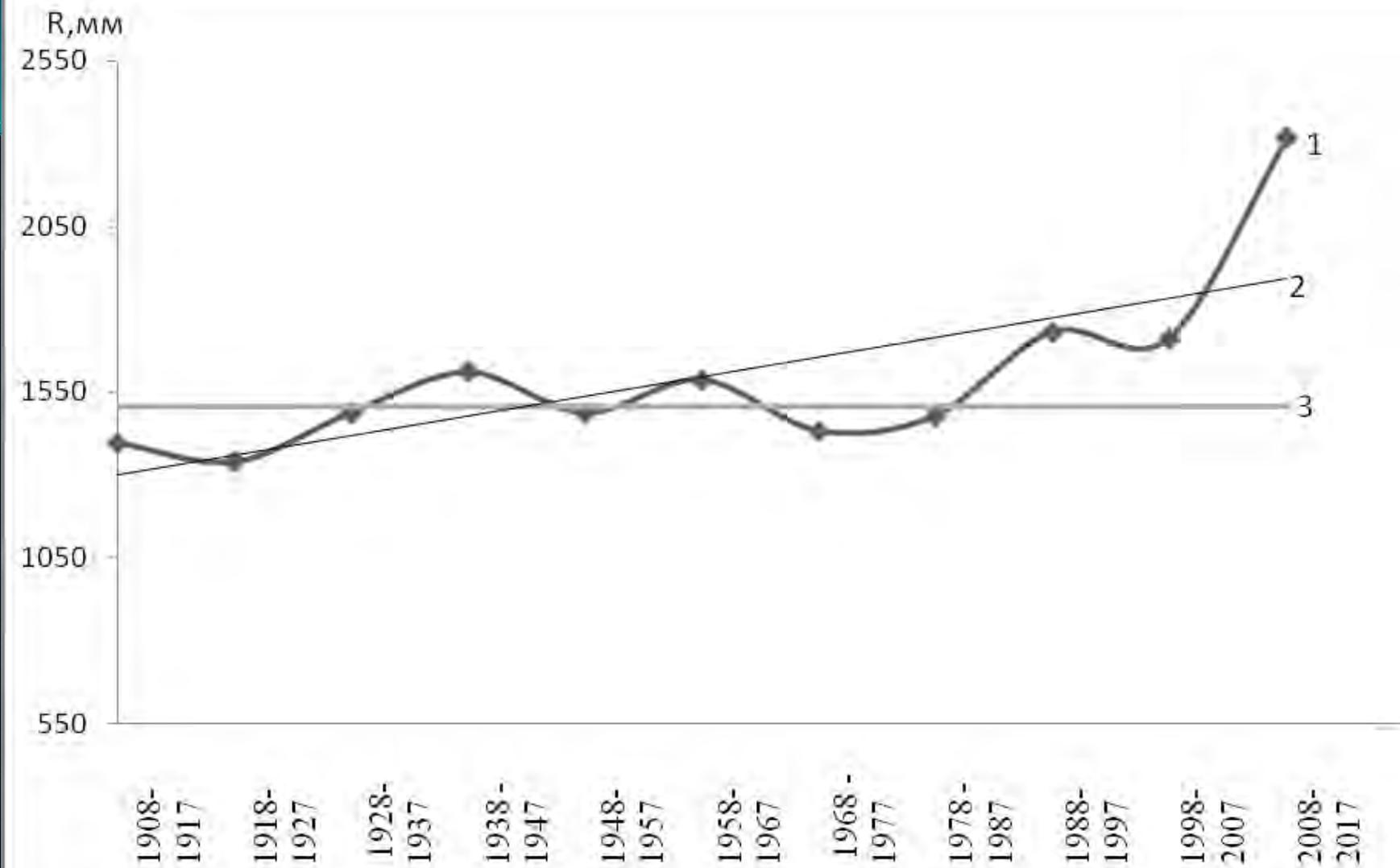
Распределение годовых сумм осадков в г.Ткуарчал, г.Сухум, г.Гагра за 1951-2016 гг.



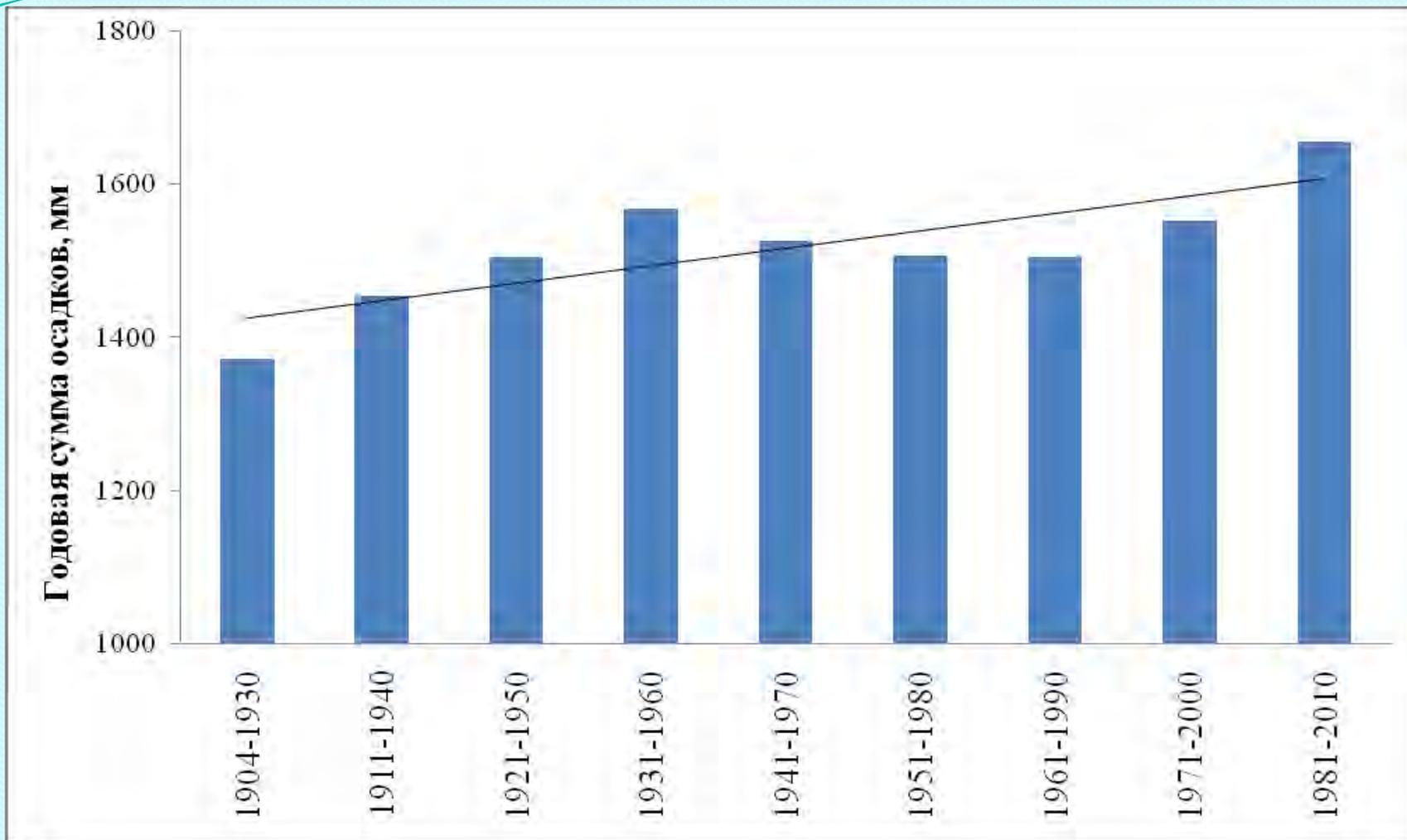
Годовые суммы осадков за период 1904-2018гг. по данным гидрометеорологической станции «Сухумский маяк».



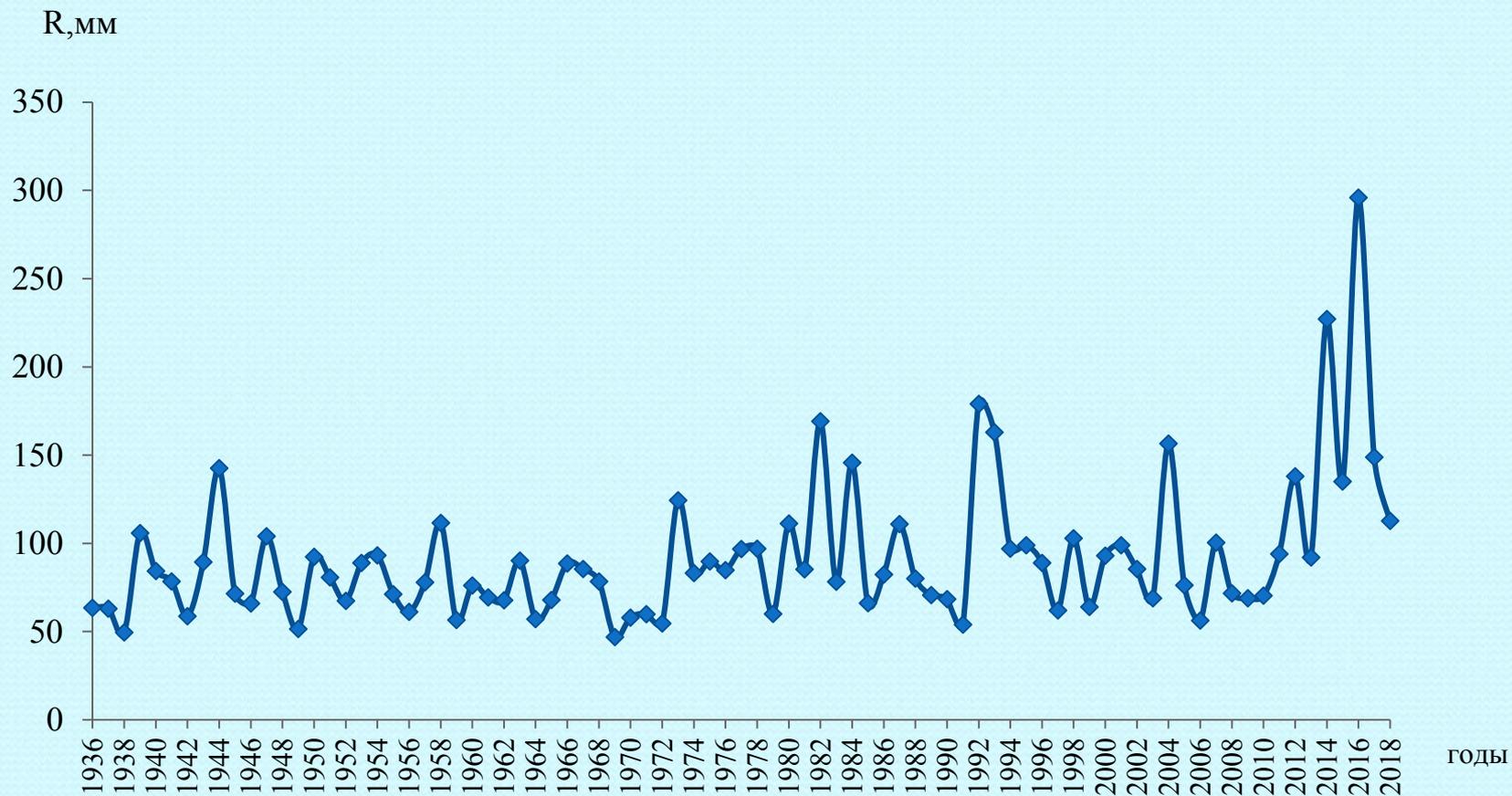
Распределение количества атмосферных осадков за период 1936-2015 гг.: 1- Сухум, 2-Сочи



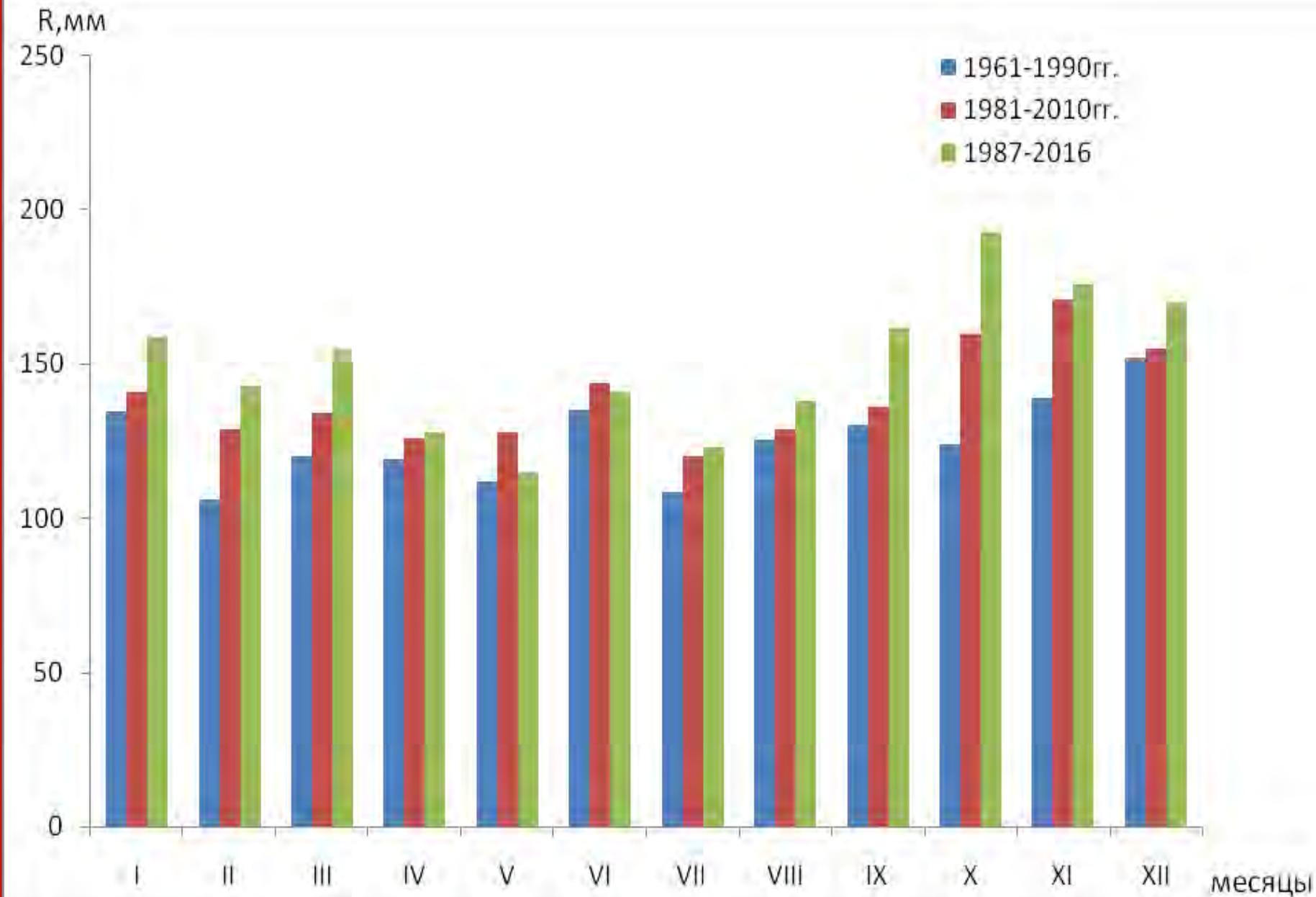
Среднегодовое количество осадков в прибрежной зоне Абхазии по десятилетиям с 1908 по 2017 г. 1 –динамика изменения количества осадков, 2 – линия тренда, 3 –среднегодовая норма осадков (климатическая норма 1961 – 1990 гг.)



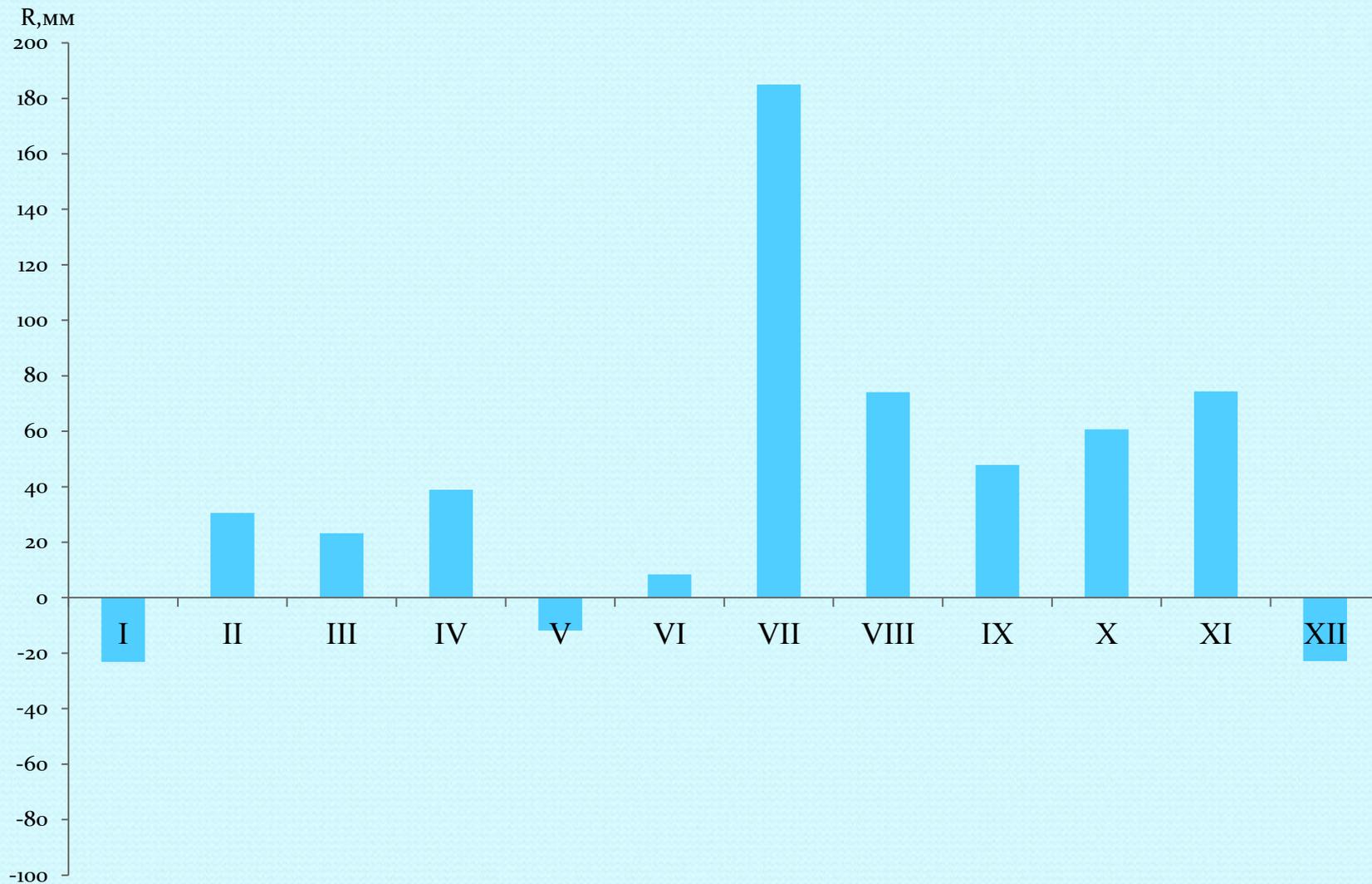
Динамика климатических норм годовых сумм осадков в Сухуме по 30-летиям с линией тренда за 1904–2010 гг



Годовой ход максимальных суточных значений атмосферных осадков в г.Сухум.



Сравнительный анализ месячных сумм осадков за период 1987-2017гг. с климатическими нормами осредненными за различные периоды (средние месячные суммы осадков за период 1961-1990 гг и 1981-2010 гг.) г.Сухум.



Аномалии осадков (мм/месяц), осредненные по территории г.Сухум за 2002–2017 гг.  
Аномалии рассчитаны как отклонения от среднего за 1961–1990 гг.

## Методика статистического оценивания экстремальных характеристик режима осадков

Для статистического оценивания экстремальных событий во временном ряду по их предельным функциям распределения существует два методических подхода (Coles, 2001; Hawkes et al., 2008). Первый (блочный) подход предполагает рассмотрение выборки максимальных значений параметра за достаточно продолжительный промежуток времени, например, максимальное за год/за месяц значение (метод максимумов). Вторым методом POT рассматривает случаи превышения параметром некоторого порога в штормах в течение года, что существенно повышает объем выборки, а, значит, и достоверность статистических оценок.

Исследование вероятностной природы экстремальных осадков в настоящей работе выполнено методом блочных максимумов. Как правило, в блочном методе используются годовые максимумы, распределение которых для больших выборок следует одному из трех асимптотических распределений – Гумбеля, Вейбулла или Фреше. В общем случае вероятностная функция зависит от вида и параметров исходного распределения гидрометеорологической величины. Однако если вид этого распределения неизвестен, то рекомендуется использовать обобщенное распределение экстремальных значений (GEV):

$$F_{GEV}(x) = \Pr\{X \leq x\} = \exp\left[-\left(1 + \xi \cdot \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{\frac{1}{\xi}}\right], \quad (1)$$

где  $\xi$  - параметр формы,  $\sigma$  - масштабирующий параметр,  $\mu$  - параметр положения экстремума. Для оценки параметров распределения можно использовать метод максимального правдоподобия (Coles, 2001). Оценка параметров  $\theta = (\beta, \xi, \sigma)$  в (5) в этом случае выполняется путем максимизации функции правдоподобия  $L(\theta, y) = \prod_{i=1}^n f(y_i | \theta)$ , где  $f(y_i | \theta)$  – плотность вероятности GEV.

Если  $F_{GEV}$  задано, то период повторяемости экстремальных величин может быть рассчитан как

$$\tau_{GEV}(x) = \frac{1}{1 - F_{GEV}(x)}.$$

Как правило, расчеты ведутся в предположении постоянства вектора параметров  $\theta$  GEV-модели распределения экстремумов (1). Однако нестационарность структуры временных рядов, используемых для построения статистической модели экстремумов, проявляется в том, что эти параметры могут быть функциями ковариантных переменных, в первом приближении линейными:

$$\begin{cases} \mu_t = \sum_{i=1}^k \beta_i U_i(t) \\ \log \sigma_t = \sum_{i=1}^k \delta_i V_i(t) \\ \xi_t = \sum_{i=1}^k \gamma_i W_i(t) \end{cases}$$

где  $U=(U_1, U_2 \dots U_k)$ ,  $V=(V_1, V_2 \dots V_k)$ ,  $W=(W_1, W_2 \dots W_k)$  – ковариантные переменные, которые, в свою очередь, могут быть функциями времени;  $\beta_i, \delta_i, \gamma_i$  – гиперпараметры;  $i=1..k$ ,  $k$  – число ковариат. Логарифм  $\sigma$  введен для сохранения положительности значений масштабирующего параметра, играющего роль стандартного отклонения, т.е. строго положительно определенной величины.

В нестационарном случае функция правдоподобия представлена в виде:

$$L_n = \prod_{t=1}^n f_{GEV}(x_t | \mu_t, \sigma_t, \xi_t), \quad (2)$$

на основании которой можно оценить (гипер)параметры распределения.

Однако ранее было показано (El Adlouni et al., 2007), что стандартный метод максимального правдоподобия неустойчив на малых выборках (наиболее частый случай на практике). Более устойчивым является метод, получивший название обобщенного метода максимального правдоподобия (ОМПП) (El Adlouni et al., 2007). Согласно нему устойчивость достигается путем априорной параметризации распределения параметра формы  $\xi$  бета-распределением:  $\pi_{\xi}(\xi) = \text{Beta}(u = 6, v = 9)$ . Параметры бета-распределения определены эмпирически, исходя из анализа большого массива геофизических данных. Тогда оценка ОМПП будет являться решением следующей оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} \max_{\theta} L_n(x; \theta) \\ \xi \sim \text{Beta}(u, v) \end{cases}$$

что фактически эквивалентно максимизации (поиска моды) апостериорного распределения параметров, определенного на выборке эмпирических данных как:

$$\pi(\theta|x) \propto L_n(x|\theta)\pi_{\xi}(\xi).$$

где функция правдоподобия  $L_n$  соответствует (2). Поиск моды этого распределения и определение необходимых параметров может быть выполнено градиентным методом, например, методом Ньютона-Рафсона.

Все расчеты выполнены в среде статистического программирования R (R Core Team, 2012).

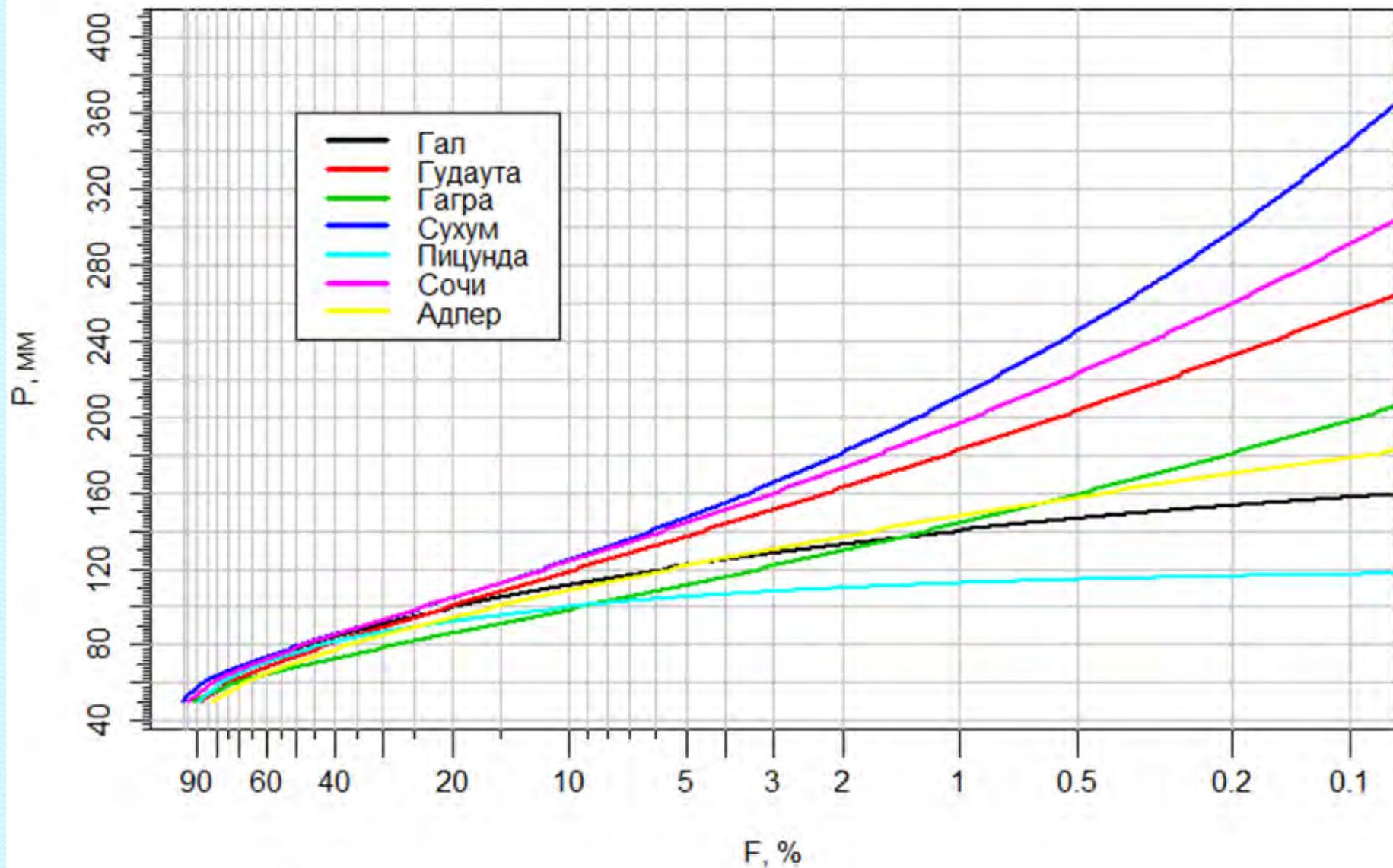
В табл.1 представлен расчет методом блочных максимумов вероятных значений наибольшего суточного количества осадков редкой повторяемости для метеорологических станций Абхазии (Гагра, Гудаута, Гал, Сухум, Пицунда) и примыкающей территории Краснодарского края РФ (Сочи, Адлер) для периодов повторяемости 10, 25, 50 и 100 лет.

Максимальное суточное количество осадков (мм), возможное 1 раз в  $n$  лет, для пунктов Абхазии и примыкающей территории Краснодарского края РФ

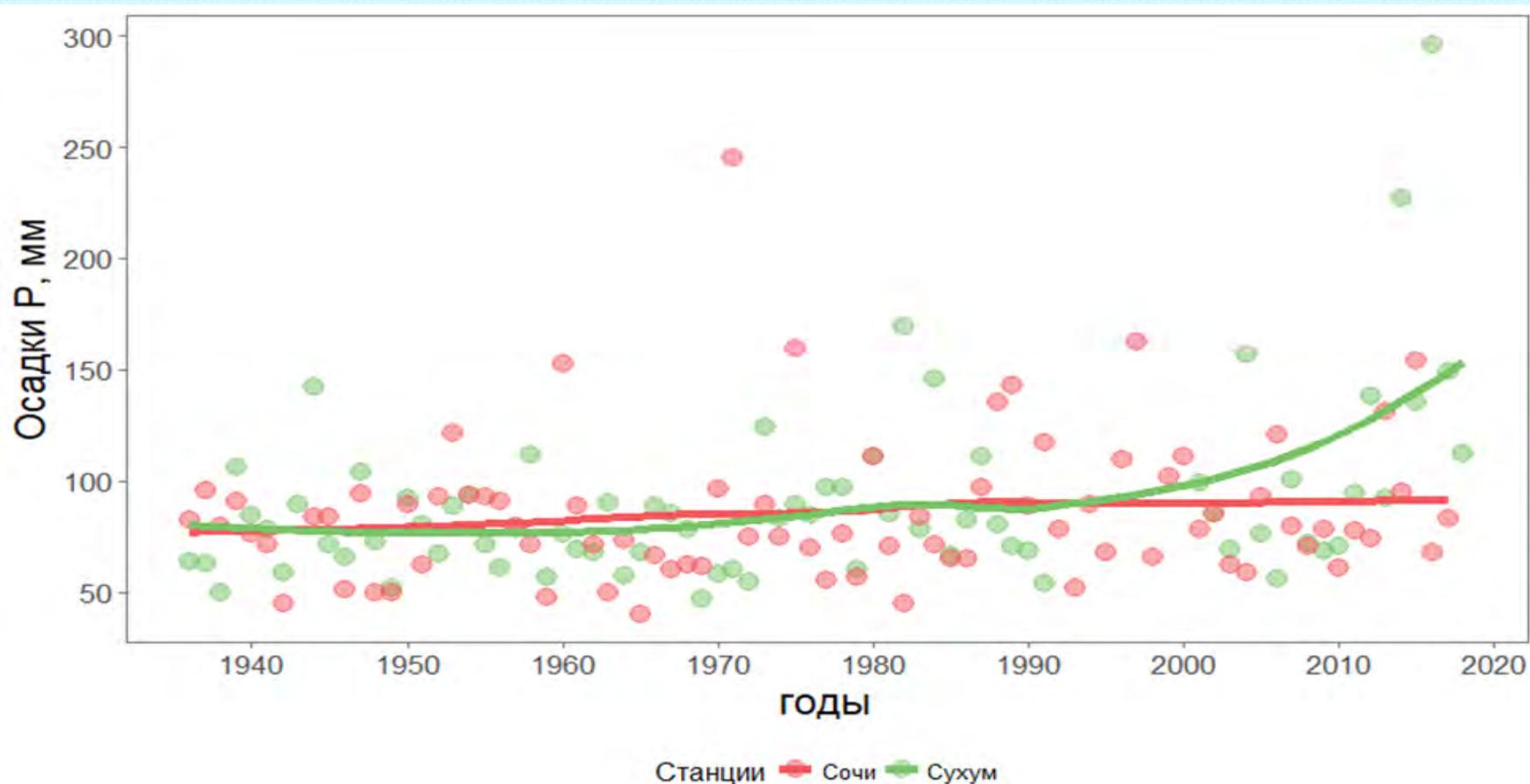
Пункт наблюдения	Объем выборки, годы	Период повторяемости, 1 раз в $n$ лет			
		10	25	50	100
Гал	34	121	143	159	175
Гудаута	33	119	144	163	183
Гагра	20	111	141	169	202
Сухум	74	113	129	141	152
Пицунда	34	100	107	110	113
Сочи	81	120	148	171	196
Адлер	39	123	151	174	197

На рис.1 представлены соответствующие кривые обеспеченностей. Объемы выборок варьировались в пределах 20-81 значений в зависимости от наличия пропусков. Методом максимального правдоподобия была получена оценка вероятных экстремумов в предположении стационарной модели GEV (1). Метод блочных максимумов является довольно эффективным способом исследования вероятностной природы экстремумов в виде статистических функций распределения максимальных величин, которые позволяют вычислить вероятные значения гидрометеорологического элемента редкой повторяемости.

# Кривые обеспеченностей наибольших суточных сумм осадков за год



Вероятностные свойства экстремумов гидрометеорологического режима могут быть различны для разных периодов квазистационарного климата. Наличие нестационарности в рядах данных может повлиять на достоверность полученных статистических оценок. На рис.2 представлен ход наибольших суточных сумм осадков по данным станций с наиболее продолжительными рядами наблюдений (Сочи и Сухум). Как видно из рисунка, временная структура рядов явно содержит трендовые компоненты, которые в первом приближении могут быть описаны полиномами первых степеней.

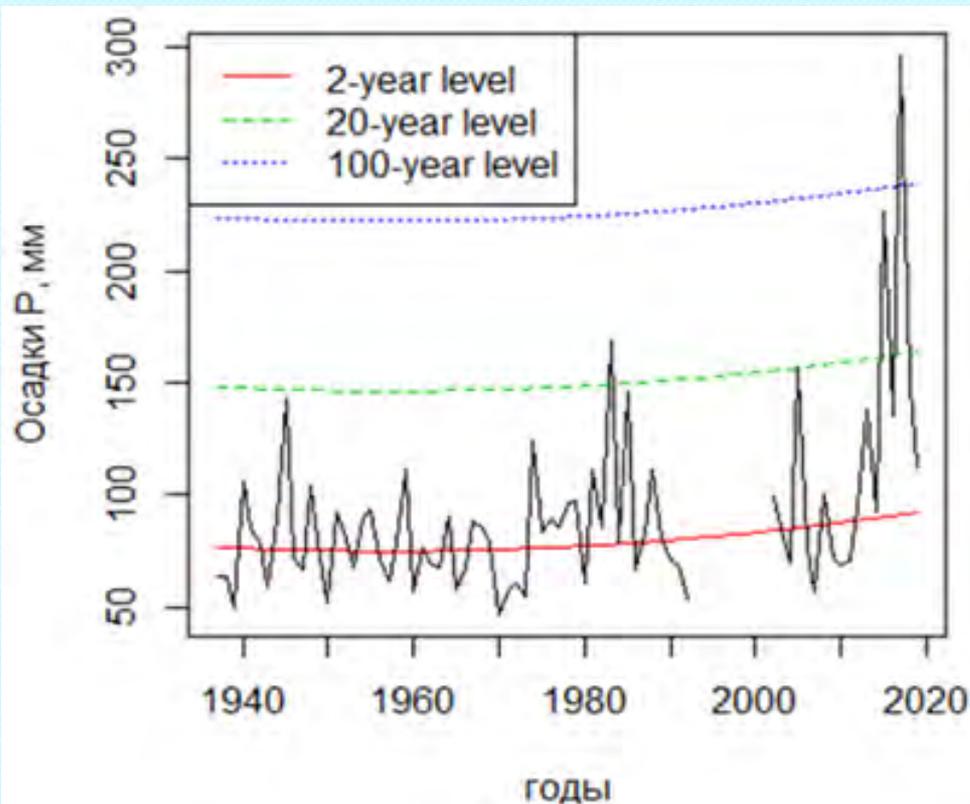


Проблема нестационарности используемых временных рядов уже давно является камнем преткновения современных климатических исследований, особенно в последние десятилетия в связи с наблюдаемыми тенденциями в эволюции крупномасштабных процессов в глобальной климатической системе и с их проявлениями на региональном уровне. Так по данным морских береговых станций в Азово-Черноморском регионе отмечается уменьшение среднегодовых скоростей приземного ветра (Гидрометеорологические условия..., Т.1, 2009; Гидрометеорологические условия..., Т.2, 2012), что согласуется с повсеместным уменьшением скорости ветра второй половины XX века во всем Северном полушарии (Vautardetal., 2010). В характеристиках волнения в прибрежной зоне Черного моря также присутствует выраженная мультидекадная изменчивость, являющаяся проявлением глобальных климатических тенденций (Polonskyetal., 2014). Эмпирические данные свидетельствуют о тенденциях к увеличению температур воздуха в среднем на 0,75 °С с начала XX века для большинства регионов Земного шара, что считается проявлением глобального потепления. Отмечается увеличение годовой повторяемости теплых и одновременное уменьшение числа холодных ночей для 70% территории Земли (Alexanderetal., 2006). Для территории Европы, и Европейской территории России за последние 60-70 лет отмечается повышение максимальных, минимальных и средних за сутки температур воздуха в холодный период года (Caesar, Alexander, 2006). Для Азово-Черноморского региона также отмечается устойчивая тенденция к потеплению климата, хотя изменение приземных температур воздуха от сезона к сезону происходит неравномерно (Евстигнеев и др., 2016). Наиболее яркая тенденция отмечается для температуры воздуха холодных месяцев года. Отмечены особенности многолетних изменений аномальных (10% и 90% квантили распределения) температур воздуха (Евстигнеев и др., 2016).

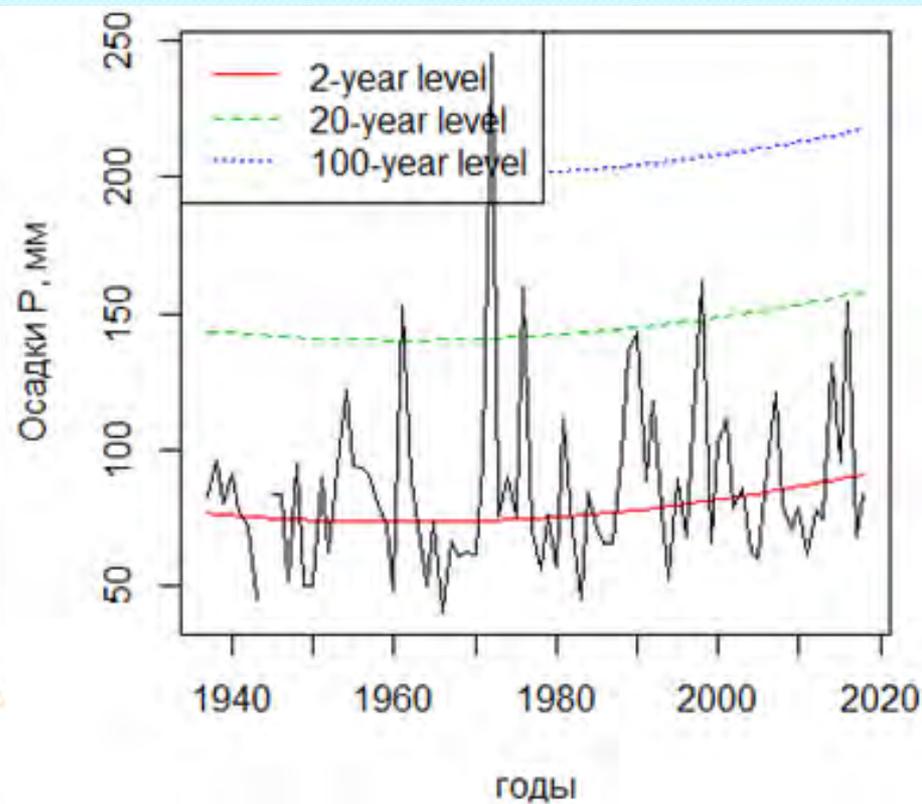
Фактор климатической нестационарности рядов определяет достоверность статистических оценок экстремумов осадков при использовании предельных распределений. В настоящей работе был выполнен расчет экстремальных характеристик режима осадков с использованием нестационарной модели GEVв предположении временной зависимости параметра положения экстремума  $\mu$ :

$$\mu(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 .$$

Расчет по метеорологическим станциям выбранного региона показал, что для шестииз семи станций региона нестационарная модель параметра локализации экстремума в GEV-модели оказалась значимой даже для короткопериодных метеорологических станций. Пример нестационарной оценки суточного количества осадков редкой повторяемости представлен на рис.3 для двух станций. В зависимости от фазы климатического изменения режима увлажнения в регионе, статистические оценки приобретают разные значения. Согласно рис.3 в современный климатический период следует ожидать больших по величине экстремумов, нежели чем в предыдущий период.

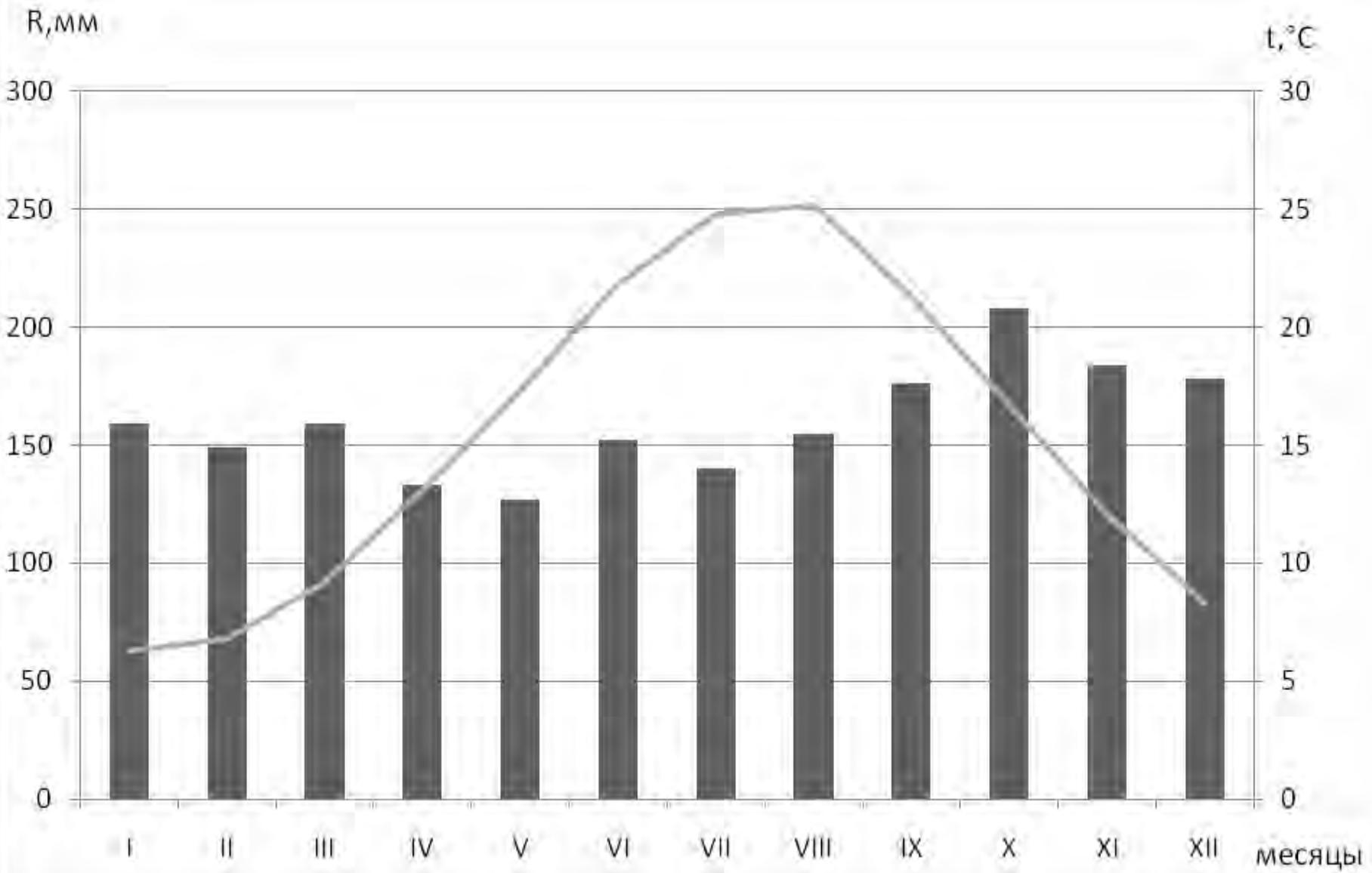


(а)

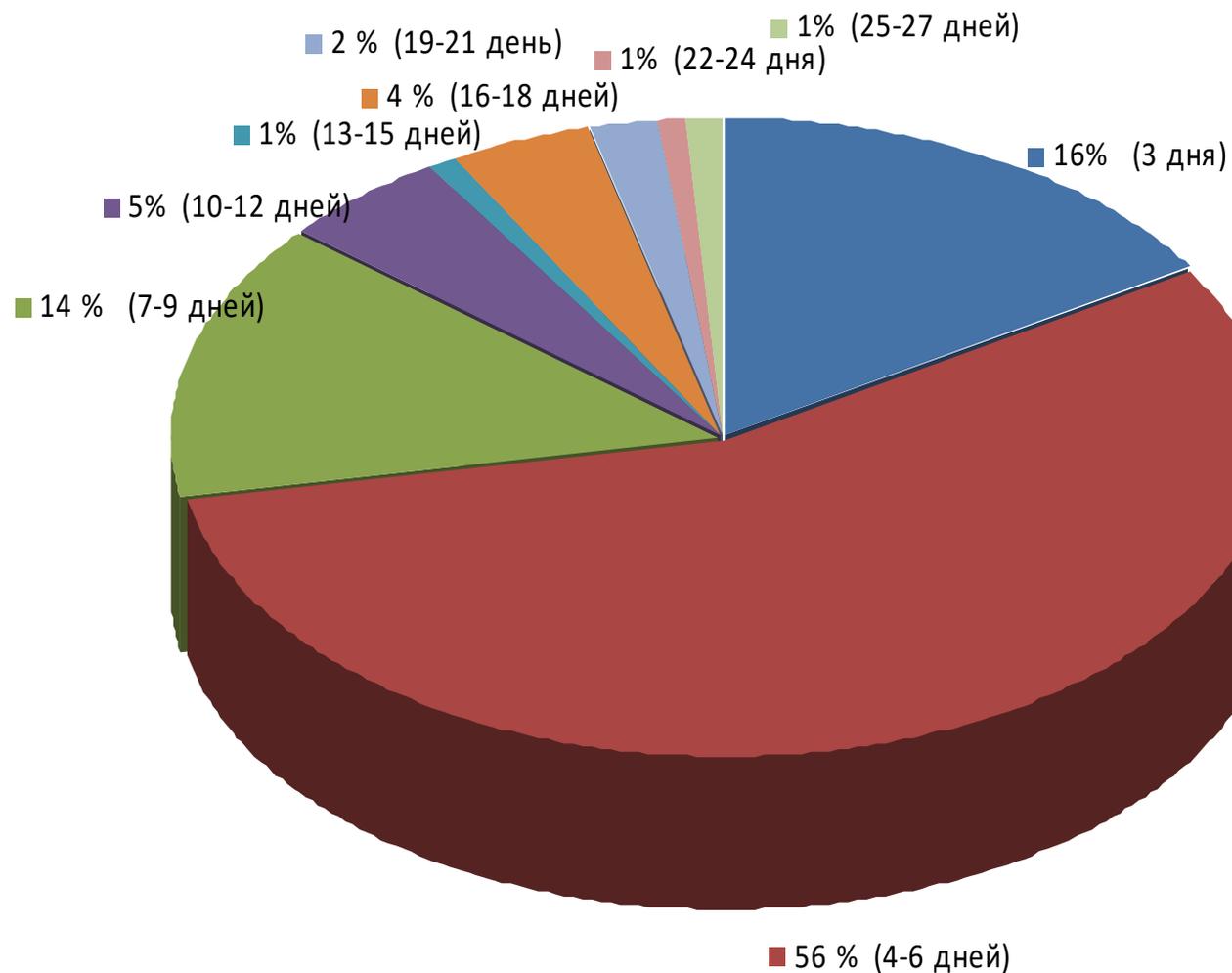


(б)

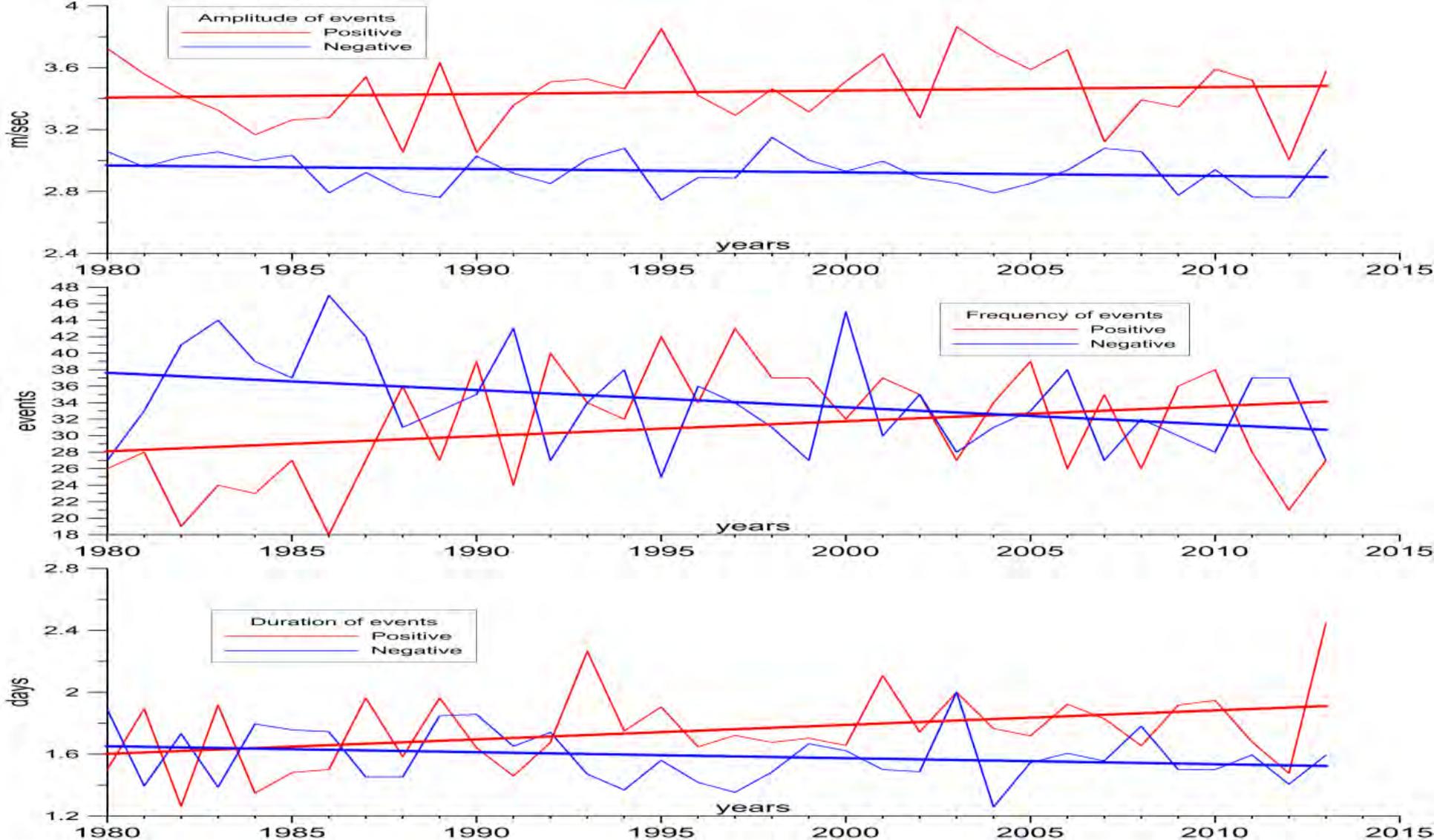
Примеры нестационарной оценки максимального суточного количества осадков редкой повторяемости для станций Сухум (а) и Сочи (б).



Месячный ход атмосферных осадков (гистограмма) и температуры приземного слоя воздуха за период 1988-2017 гг. в прибрежной зоне Абхазии.



Число бездождных дней за летний период в г. Сухум.



Ежегодные изменения средней амплитуды (верхняя часть), количества (средняя часть) и средней продолжительности (нижняя часть) экстремальных явлений с положительными (красные линии) и отрицательными (синие линии) аномалиями модуля скорости ветра на высоте 10 м от поверхности в регионе Абхазии ( $42^{\circ}$ - $43.5^{\circ}$  с.ш.;  $40^{\circ}$ - $42^{\circ}$  в.д.), превосходящими 1 стандартное отклонение и их линейные тренды.

В Абхазии за последние 20 лет часто наблюдаются случаи, когда за несколько дней выпадает месячная норма осадков. В ряде районов происходят оползни (в особенности Ткуарчалском районе)



Эрозия речного берега в пос.Акармара Ткуарчалского района (май 2017 года)



Оползни в пос.Джантух Ткуарчалского района (май 2018 года).



Наводнение в ц. ч.г.Сухум 7 июля 2018 г.



Кисловодск июль 2018 г.



Туапсе октябрь 2018 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение многолетней среднегодовых сумм осадков имеет положительный тренд .

Фактор климатической нестационарности временных рядов оказывает влияние на статистическую оценку годовых максимумов осадков редкой повторяемости. Климатические изменения максимальных гидрометеорологических величин должна быть учтена во всех исследованиях и расчетах, касающихся анализа рисков и возможного ущерба от опасных гидрометеорологических явлений.

Так, подобная закономерность должна проявляться в характеристиках экстремального стока рек в исследуемых регионах, имеющих существенную зависимость от количества осадков на площади водосбора рек особенно в период паводков.

A wide-angle photograph of a pebbly beach. The foreground is filled with smooth, multi-colored pebbles in shades of grey, brown, and white. Gentle waves with white foam are washing onto the shore from the left. The sea extends to the horizon under a heavy, overcast sky with grey and white clouds. The overall mood is calm and serene.

**БЛАГОДАРЮ  
ЗА ВНИМАНИЕ!!!**