

## Метеорологические условия формирования селевых потоков в северной части Французских Альп

© 2012 г. И.О. Павлова<sup>1</sup>, В. Джомелли<sup>1</sup>, Д. Граншер<sup>1</sup>, Д. Брунштейн<sup>1</sup>, М. Врак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория физической географии Национального центра научных исследований (CNRS), г. Медон, Франция;

<sup>2</sup>Лаборатория наук о климате и окружающей среде Национального центра научных исследований (CNRS),

г. Гиф-сюр-Иветт, Франция

*irina.pavlova@cnrs-bellevue.fr*

*Статья принята к печати 16 июня 2011 г.*

Метеорологические параметры, региональный масштаб исследований, селевой поток, сход селя.

Meteorological parameters, mudflow, regional scale, release of mudflow.

Главная задача данного исследования – выявление метеорологических параметров, способствующих сходу селевых потоков в северной части Французских Альп за последние 40 лет. Для этого использован многомерный статистический подход. Первоначально на основе данных четырёх метеостанций при помощи метода главных компонент вычислялись региональные метеопараметры – среднемесячная температура воздуха и количество осадков. Затем, на основе полученных данных первой главной компоненты, строилась логистическая вероятностная модель, которая связывала метеопараметры с базой данных о сходе селевых потоков, содержащей 298 событий за период с 1971 по 2008 г. Многочисленные тесты позволили найти наиболее значимую модель, которая объясняет более 60% случаев схода селей. В основе её – метеорологические предикторы (число дней с осадками и среднемесячная минимальная температура с мая по сентябрь).

### Введение

В настоящее время в большинстве работ, посвящённых исследованию климатических изменений в Альпах, на основе региональных моделей прогнозируются увеличение количества летних осадков и более частые случаи экстремально сильных дождей [4]. Известно, что сход селевых потоков часто связан с обильными дождевыми осадками [3], и естественно, что региональные климатические изменения могут повлиять на мощность и частоту проявления данного процесса. Поэтому весьма важна связь между изменениями климатических параметров и сходом селей.

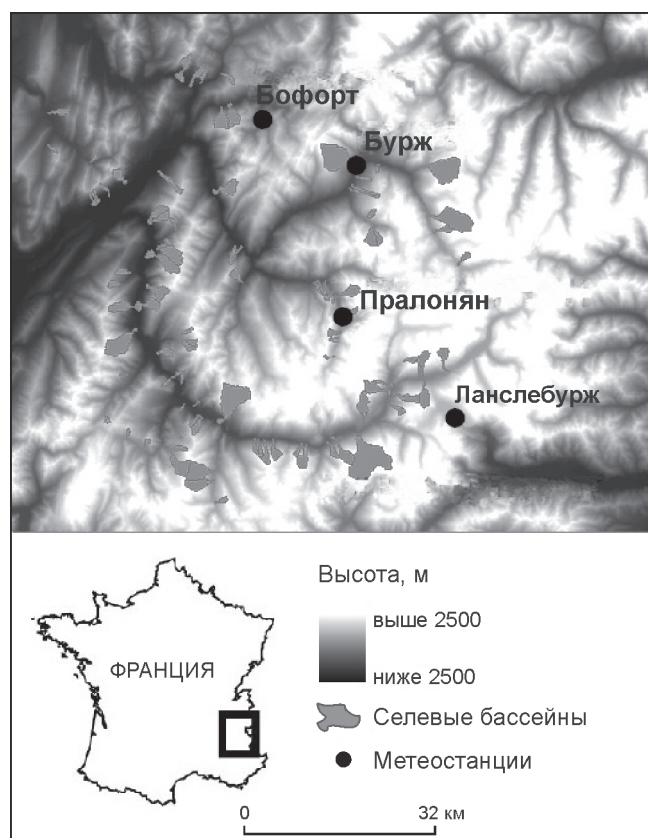
В последние десятилетия проблеме связи климатических условий и схода селевых потоков посвящено несколько крупных работ. Отметим, что исследования касались разных по масштабам территорий. Одни работы фокусировались на анализе климатических причин схода селей в отдельных селевых бассейнах и детально описывали геоморфологические характеристики, учитывая при этом наблюдения близлежащих метеостанций [9]. Другие работы освещали влияние климатических условий на селевые явления в мелком масштабе – для территории площадью 20–50 км<sup>2</sup>, учитывая, скорее, региональные тренды (например, расчёт интенсивности/длительности осадков, предшествующих селевому сходу), чем прямые наблюдения [3]. На примере Центрального Кавказа разработан статистический подход расчёта фонового прогноза ливневых селей [1].

Большинство исследований Французских Альп представляют собой технические отчёты для отдельных селевых бассейнов. В. Джомелли и др. [7] изучали взаимосвязь климатических условий с различными склоновыми процессами на основе литологии и типологии зоны аккумуляции селевого бассейна на территории южной части Французских Альп. Наиболее важные параметры – экстремальные осадки в летний период, а также число дней с заморозками. Детально исследована также группа селевых бассейнов в пределах одной долины массива Экрэн на юге Французских Альп [8]. Прямой связи между сходом селей и годовым распределением осадков не установлено, а причинами схода селей названы количество дневных осадков, превышающее 20 мм, а также повышенные количества среднемесячных осадков.

Основная цель нашей работы – выяснить влияние современного климата на селевую активность в северной части Французских Альп.

### Район исследования

Район исследования, расположен на территории департамента Савуа в Северных Альпах (рис. 1). Главные долины рек Изер, Гран Арк и их притоков разделены горным массивом Вануаз со средней абсолютной высотой около 2000 м. Юго-восточная часть региона, включая верховья долины р. Арк, сложена сланцами, центральная часть массива Вануаз – кристаллическими породами, а северо-запад территории покрыт мощным чехлом осадочных отложений.



**Рис. 1.** Положение селевых очагов и метеостанций  
**Fig. 1.** Mudflow catchment area and location of the meteorological stations

Долины рек Арк и Изер — наиболее популярные рекреационные территории Французских Альп. Здесь расположено множество горнолыжных курортов, где каждый сезон отдыхает более одного миллиона туристов. Существующая и значительно расширяющаяся в настоящее время сеть населённых пунктов с сопутствующей инфраструктурой находится в зоне потенциальной селевой опасности. В данной ситуации жизненно важны обеспечение постоянного мониторинга селевой активности и проведение защитных мероприятий.

#### База данных схода селевых потоков и метеорологические данные

Данные о сходе селевых потоков, использованные в работе, получены из отчётов лесной службы, основанной в начале XX в. для всей территории Французских Альп. Среди других источников информации — научные журналы, технические отчёты и неопубликованные документы. Первое упоминание о сходе селевого потока датируется XIV в., но авторами исследовался материал только за последние 40 лет — с 1971 по 2008 г., так как эти данные наиболее однородны и достоверны. Имеющаяся база данных дополнена серией полевых наблюдений 2009 и 2010 гг.

С 1971 по 2008 г. в Северных Альпах зарегистрировано 298 случаев схода селевых потоков в 102 селевых бассейнах. Каждый селевой бассейн был оцифрован на основе топографической карты масштаба 1:25 000. По итогам этой работы составлена ГИС схода селевых потоков. Описание каждого события включает в себя: идентификационный номер селевого очага, высоту зоны зарождения и аккумуляции, некоторые морфометрические характеристики бассейна, метеорологическую обстановку до и во время схода селя, а иногда — и информацию о повреждениях окружающей инфраструктуры. По результатам анализа ГИС селевой базы установлено, что среднестатистический селевой бассейн имеет площадь 3 км<sup>2</sup> и длину тальвега 1 км. Зона зарождения селевого очага располагается в высотном поясе от 800 до 2800 м.

Для характеристики климатических условий в регионе использованы материалы метеостанций, расположенных на разных высотах. Их предоставила организация Météo-France. За 1971–2008 гг. были доступны данные по ежедневной сумме осадков, а также по максимальной и минимальной дневной температуре по четырём метеостанциям: Бофорт, Бурж Сан-Морис, Пралонян и Ланслебурж. При дальнейшем статистическом анализе рассчитывались дополнительные характеристики: количество среднемесячных осадков в селеопасный период; число дней с осадками в селеопасный период за год; число дней с суммой осадков больше 10, 20, 30 и 40 мм/день; среднемесячные максимальные и минимальные температуры воздуха.

#### Методы исследования

Для определения связи селевой активности с климатом использовались материалы перечисленных метеостанций. С помощью метода главных компонент получена основная составляющая регионального климатического сигнала. Кроме того, данный метод позволяет уменьшить степень многомерности данных. Используя метод главных компонент отдельно для каждой из температурных характеристик и осадков, получали главные компоненты, которые применялись для последующего анализа в логистической регрессионной модели.

**Логистическая регрессионная модель.** Логистический регрессионный анализ часто используется для исследования взаимосвязи набора объясняющих переменных (метеопараметры) и дискретных величин (наличие или отсутствие события) [6]. Логистическая регрессия даёт возможность установить вероятность происхождения или отсутствия события в зависимости от объясняющих переменных. Она основана на логистической функции, которую можно представить в виде

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right), \quad (1)$$

где  $p$  — вычисляемая вероятность.

Главное допущение состоит в том, что  $\text{logit}(p)$  может быть аппроксимирован линейной комбинацией экспликативных факторов

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = a_0 + \sum_{k=1}^k a_k x_k, \quad (2)$$

где  $a_k$  —  $k$ -й линейный коэффициент;  $x_k$  —  $k$ -й предиктор;  $k$  — число предикторов.

После упрощения уравнения (1) получаем:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-\text{logit}(p)}} \quad \text{или} \quad (3)$$

$$p = \frac{e^{\text{logit}(p)}}{1 + e^{\text{logit}(p)}}, \quad (4)$$

что, основываясь на уравнении (2), можно представить в следующем виде:

$$p = \frac{e^{a_0 + \sum_{k=1}^k a_k x_k}}{1 + e^{a_0 + \sum_{k=1}^k a_k x_k}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) применяется на практике для связи вероятности события  $p$  с объясняющими события факторами  $x_{kk}$ , где  $kk = 1, \dots, K$ . Логистическая модель использована для поиска метеопараметров (осадки и температура), с которыми наиболее достоверно были бы связаны случаи схода селевых потоков в регионе. Данная модель рассчитывалась с шагом в один месяц (с мая по сентябрь): месяцам со сходом селевого потока присваивался код 1, а месяцам с отсутствием этого процесса — код 0. Серии главных компонент метеопараметров использовались в качестве экспликативных переменных.

Для определения качества каждой регрессионной модели рассчитывалось несколько стандартных проверочных тестов. Основное качество критерия — процентное соотношение верно предсказанных случаев схода/несхода селевого потока. На основании многочисленных тестов создана наилучшая модель, содержащая характеристику и осадков, и температуры.

### Полученные результаты

На выбранной территории в период селевой активности (с мая по сентябрь 1971–2008 гг.) было 98 месяцев с зарегистрированными случаями схода селевых потоков и 88 месяцев — без схода. Первоначально параметрами, связанными со сходом селей, были выбраны: среднее количество осадков; число дней в месяц с осадками; число дней в месяц с суммарными осадками, превышающими 10, 20 и 30 мм/день; среднее минимальная или максимальная температуры. Для каждого из этих параметров методом главных компонент рассчитаны региональные климатические показатели. Первые главные компоненты содержали более 70% общего

Таблица 1. Главные компоненты метеопараметров, %

| Метеопараметры                    | Доля главной компоненты |        |         |
|-----------------------------------|-------------------------|--------|---------|
|                                   | первой                  | второй | третьей |
| Среднемесячное количество осадков | 72,635                  | 19,149 | 5,051   |
| Число дождливых дней:             |                         |        |         |
| общее                             | 63,213                  | 19,823 | 8,955   |
| с суммой осадков > 10 мм          | 78,633                  | 12,207 | 5,232   |
| с суммой осадков > 20 мм          | 57,394                  | 21,875 | 10,756  |
| с суммой осадков > 30 мм          | 47,135                  | 30,484 | 13,581  |
| Температура:                      |                         |        |         |
| минимальная                       | 95,571                  | 2,244  | 1,666   |
| максимальная                      | 95,806                  | 2,933  | 1,035   |

сигнала характеристик осадков и более 90% общего сигнала температурных характеристик, поэтому для дальнейшего анализа использовались только первые компоненты (табл. 1).

Доля главных компонент для каждой выбранной метеостанции практически одинакова (табл. 2) Вес каждой станции составлял около 25%, и только Ланс-лебурж имела более низкие значения для показателей осадков. Первоначально каждая климатическая характеристика поочередно тестировалась для определения наиболее значимого параметра по серии данных осадков и температуры. После серий тестирования различных комбинаций определялись две наиболее значимые модели. Регрессионные модели, включающие в себя либо число дождливых дней, либо минимальную температуру, объясняют соответственно 60 и 62% случаев схода селей (табл. 3).

**Статистические критерии значимости двух независимых логистических моделей (использованы метеопараметры с наиболее значимыми коэффициентами).** Среднемесячная минимальная температура  $T_n$  и число дождливых дней  $Ч_{дд}$  оказались лучшими параметрами логистической модели, поэтому была построена ещё одна модель, содержащая оба параметра. Коэффициенты этой модели были более значимы, чем для двух независимых моделей (табл. 4). Ниже приводится процентное соотношение верно спрогнозированных случаев схода селей.

| Отсутствие селевого схода (0) | Сход селей (1) | Достоверность модели, % |
|-------------------------------|----------------|-------------------------|
| 64                            | 34             | 65,31                   |
| 32                            | 56             | 63,64                   |
| 96                            | 90             | 64,52                   |

Логистическая модель вероятности ( $p$ ) схода селевого потока в линейном уравнении, сочетающем уравнения (1) и (2), имеет следующий вид:

$$p = -0,14 + 0,44T_n + 0,39Ч_{дд}. \quad (6)$$

На рис. 2 показано распределение вероятности схода селевого потока в зависимости от среднеме-

Таблица 2. Доля каждой станции (данные ежедневных наблюдений за температурой воздуха и осадками в 1971–2008 г.) в распределении главных компонент для каждого метеопараметра, %

| Метеопараметры                    | Метеостанции* |        |                 |               |
|-----------------------------------|---------------|--------|-----------------|---------------|
|                                   | Бо-<br>форт   | Бурж   | Лансле-<br>бурж | Прало-<br>нян |
| Среднемесячное количество осадков | 27,659        | 29,164 | 13,768          | 29,409        |
| Число дождливых дней:             |               |        |                 |               |
| общее                             | 28,839        | 27,229 | 14,19           | 29,742        |
| с суммой осадков > 10 мм          | 27,536        | 26,052 | 19,454          | 26,959        |
| с суммой осадков > 20 мм          | 27,91         | 29,609 | 11,851          | 30,63         |
| с суммой осадков > 30 мм          | 33,022        | 36,209 | 7,285           | 23,484        |
| Температура:                      |               |        |                 |               |
| минимальная                       | 25,417        | 25,333 | 24,409          | 24,842        |
| максимальная                      | 25,555        | 25,483 | 23,768          | 25,193        |

\*Бофорт – 45°41' с.ш., 6°34' в.д., 1030 м над ур. моря; Бурж – 45°36' с.ш., 6°45' в.д., 865 м над ур. моря; Ланслебурж – 45°13' с.ш., 6°56' в.д., 2000 м над ур. моря; Пралонян – 45°23' с.ш., 6°43' в.д., 1420 м над ур. моря.

Таблица 3. Статистические критерии значимости двух независимых логистических моделей (использованы метеопараметры с наиболее значимыми коэффициентами)

| Метеопараметры модели                  | Критерий хи-квадрат Chi <sup>2</sup> | Уровень значимости | Величина коэффициента регрессии | Достоверность модели, % |
|----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| <i>Первая модель</i>                   |                                      |                    |                                 |                         |
| Число дождливых дней в месяц           | 9,427                                | 0,002              | 0,258                           | 60,22                   |
| <i>Вторая модель</i>                   |                                      |                    |                                 |                         |
| Среднемесячная минимальная температура | 9,299                                | 0,002              | 0,255                           | 62,90                   |

сячной минимальной температуры и числа дождливых дней в период с мая по сентябрь. Вероятность схода значительно увеличивается, если оба показателя положительны.

Статистический анализ селевой обстановки в северном регионе Французских Альп позволил оценить роль различных климатических параметров в сходе селевых потоков. Рассмотренные нами модели в целом соответствуют современным представлениям по данной проблеме. Исследования учёных России [1], США [9] и Швейцарии [10] показали, что существует тесная взаимосвязь схода селевых потоков и осадков, а точнее – суммарного количества осадков предшествующих двух недель до схода селей и их интенсивности. Модель данного исследования

Таблица 4. Метеорологические характеристики логистической модели с лучшими показателями для параметров температуры и осадков

| Метеопараметры модели                  | Критерий хи-квадрат Chi <sup>2</sup> | Уровень значимости | Величина коэффициента регрессии | Достоверность модели, % |
|----------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Число дождливых дней                   | 19,909                               | < 0,0001           | 0,430                           | 64,52                   |
| Среднемесячная минимальная температура | 19,781                               | < 0,0001           | 0,422                           |                         |

для участка Французских Альп также показывает влияние числа дождливых дней в весенне-летний период на селевую активность.

Один из параметров наиболее значимой статистической модели – температурная характеристика. Существует несколько возможных объяснений значимости этого параметра. Известно, что для схода селевого потока дождевого типа необходимы два главных условия [3]: продолжительные сильные осадки и значительный объём твёрдого материала. Минимальная температура косвенно отражает процесс накопления стока из твёрдого материала, как это было обнаружено, например, в Южных Альпах [7]. Количество вовлекаемого твёрдого мате-

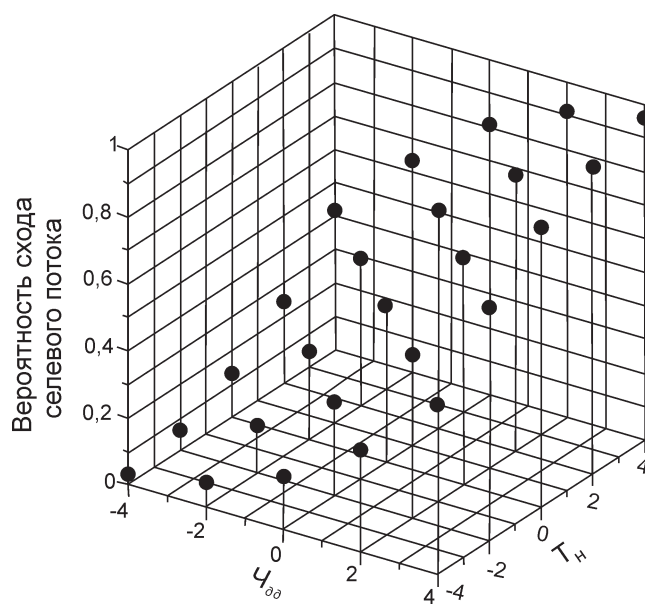


Рис. 2. Вероятность схода селевого потока.

Ч<sub>до</sub> – первая главная компонента для числа дождливых дней в месяц; T<sub>н</sub> – первая главная компонента для среднемесячной минимальной температуры

Fig. 2. Mudflow triggering probability.

Ч<sub>до</sub> – F1 for number of monthly rainy days; T<sub>н</sub> – F1 for monthly minimal temperature

риала в селевой сток зависит от объёма материала, накопленного на склонах и в зоне аккумуляции селевого бассейна, а также образуемого процессами морозного выветривания [5].

### Заключение

В последние десятилетия повсеместно отмечается повышение температуры воздуха на значительных высотах [2], в том числе и на четырёх метеостанциях, данные которых использованы для нашего исследования. Средняя абсолютная высота селевого бассейна составляет 2200 м и проходит близко к высоте нулевой изотермы для данного региона. Температурные характеристики в вероятностной модели в ряде случаев, возможно, отражают деградацию мёрзлой толщи, что уже отмечалось в других работах по Альпам [5]. Иная интерпретация результатов модели может быть связана с влиянием температуры на высоту снеговой линии. Так, для прогнозирования схода ливневых селей в высокогорье Кавказа предложена методика суммирования среднесуточных температур воздуха и осадков от даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °C [1]. Температура может также отражать изменение в продолжительности залегания снежной толщи и весеннего снеготаяния. Последующие детальные исследования позволят уточнить и объяснить причины, по которым именно эти параметры относятся к главным. Кроме того, будут найдены различия в характеристиках южных и северных Французских Альп.

Исследование проведено сотрудниками Лаборатории физической географии (LGP, CNRS-Meudon) в рамках проектов ACQWA (Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water) и Scampei (Scenarios Climatiques Adaptes aux zones des Montagne: Phenomenes extremes, Enneigement et Incertitudes).

### Литература

1. Андреев Ю.Б., Сейнова И.Б. Модельно-статистический подход к разработке прогноза ливневых селей на примере высокогорного Центрального Кавказа // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1984. № 4. С. 86–92.
2. Beniston M., Diaz H.F., Bradley R.S. Climatic change at high elevation sites: an overview // Climatic Change. 1997. № 36. P. 233–250.
3. Caine N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris-flows // Geografiska Annaler. 1980. V. 62 A. № 1–2. P. 23–27.
4. Deque. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values // Glob. Planet Change. 2007. V. 57. P. 16–26.
5. Haeberli W., Beniston M. Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps // Ambio. 1998. V. 27. P. 258–265.
6. Hosmer D., Lemeshow S. Applied Logistic Regression. Springer, 2000. 352 p.
7. Jomelli V., Brunstein D., Vrac M., Deque M., Grancher D. Impacts of future climatic change (2070–2099) on the potential occurrence of debris flows: a case study in the Massif des Ecrins (French Alps) // Climate Change. DOI 10.1007/s10584-009-9616-0, 2009
8. Remaitre A. Morphologie et dynamique des laves torrentielles: Application aux torrents des terres noires du bassin de Barcelonnette // PhD Thesis. 2006. 483 p.
9. Rupert M.G., Cannon S.H., Gartner J.E., Michael J.A., Hessel D.R. Using logistic regression to predict the probability of debris flows in areas burned by wildfires, southern California, 2003–2006 // U.S. Geological Survey open-file report. 2008. 9 p.
10. Zimmermann M., Haeberli W. Climatic change and debris flow activity in high- mountain areas. A case study in the Swiss Alps // Greenhouse-Impact on Cold-Climatic Ecosystems and Landscapes, Catena Supplement, 1992. V. 22. P. 59–72.

### Summary

A mudflow phenomena are at the top of the list of dangerous natural hazards in the mountains areas all over the world. Among factors resulting in a mudflow phenomena triggering, meteorological conditions are considered to be the most relevant. The general objective of this study was to identify meteorological parameters controlling the triggering of mudflow phenomena in one part of the French Alps over the last 40 years. Major factors are quite well explored at the global scale or contrariwise in very precise territory in particular catchment areas. However, for now we have a poor knowledge of those factors at the scale of a medium-sized region (including catchments with different geomorphic characteristics over several km<sup>2</sup>) especially in the French Alps. In addition, in this region only a few studies focused on relationships with climate. To understand mudflow phenomena activity and their link with meteorological parameters in the north region of the French Alps, we used a multivariate statistical approach. Regional meteorological parameters (such as mean monthly temperature and precipitation) were first computed from a Principal Component Analysis of observed meteorological data from four weather stations. A binomial monthly logistic regression probability model was then fitted between the main principal components and mudflow phenomena data base composed of 298 debris flow events triggered between 1971 and 2008. Results revealed that the most successful model including two meteorological predictors (minimal monthly temperature and the number of rainy days between May and September) correctly explains more than 60% of the mudflow phenomena events.