

Анализ инструментальных записей схода ледника Колка по данным локальной сети сейсмических наблюдений

В.Б. Заапишвили¹, Н.И. Невская², А.К. Харебов³

СХОД ЛЕДНИКА КОЛКА. ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Локальная сеть сейсмических цифровых станций на территории Республики Северная Осетия-Алания была организована Геофизическим центром экспериментальной диагностики ВНЦ РАН (ГФЦЭД) в 1998 году. На всех пунктах наблюдения установлена регистрирующая аппаратура «Альфа-Геон». В 2002 году функционировало 6 сейсмических пунктов наблюдений: во Владикавказе, Ардоне, Чиколе, Заманкуле, Фиагдоне и Цее (соответственно коды станций VLD, ARD, СИК, ZAM, FIG, CEY). Кроме перечисленных сейсмических станций, следует отметить установку в 2003 г. станции в Дигории (DIG). Крайне необходимая сейсмическая станция в пункте Кармадон (KAR) была включена в сеть 8 сентября 2003 г. после почти двухлетнего бездействия. В настоящее время в сеть объединено 8 сейсмических станций [1].

Для обработки данных сейсмических наблюдений по методике Центра «ГЕОН» применяется комплекс компьютерных программ, позволяющих выполнять

локализацию очагов землетрясений, а также определять напряженно-деформированное состояние массива, т.е. механизмы очагов землетрясений.

20 сентября 2002 г. действующими на тот период станциями указанной локальной сети (Фиагдон, Заманкул, Чикола, Владикавказ 31, Владикавказ 37, Ардон) был зарегистрирован сход ледника Колка (рис. 1–6). Обе станции Владикавказ были расположены на одном участке [2]. Необходимо отметить, что время срабатывания станций сети определялось особенностями настройки. Локальная сеть наблюдений создавалась в основном для регистрации сейсмических событий, которые, как правило, в регионе характеризуются значительно меньшей длительностью.

Необходимо отметить, что величина регистрируемого минимального уровня воздействия, учитывая процесс затухания сейсмической энергии, фактически является уровнем триггерного включения регистраторов РСС «Альфа-Геон» станций сейсмических наблюдений локальной сети ГФЦЭД. Другими словами, сейсмические станции работают в ждущем режиме и включаются при достижении амплитудой движения грунта определенного уровня. При этом, очевидно, на чувствительность срабатывания станций заметное влияние может оказывать и спектральный состав приходящих колебаний (рис. 7).

Анализ амплитудных спектров Фурье показывает, что с удалением от места схода ледника или относительно «исходных» записей ст. Фиагдон спектральный состав колебаний становится низкочастотным (рис. 7). Особенно заметно поглощается высокочастотная составляющая в районе расположения ст. Чикола (рис. 5). Это соответствует хорошо известному факту прямой пропорциональности поглощения частоте или даже квадрату частоты колебаний. С другой стороны, на записи ст. Заманкул (рис. 6) наблюдается факт сдвига спектра в высокочастотную область спектра. Указанные особенности могут быть объяснены рядом причин, которые более корректно реализовать после получения большей информации.

В то же время на основе работы с фондовыми материалами было установлено, что грунтами ос-



Рис. 1. Расположение сейсмических станций, зарегистрировавших сход ледника Колка.

¹ В.Б. Заапишвили – д.ф.-м.н., директор ГФЦЭД ВНЦ РАН и РСО-А.

² Н.И. Невская – зав. лаб. ГФЦЭД ВНЦ РАН и РСО-А.

³ А.К. Харебов – аспирант, ГФЦЭД ВНЦ РАН и РСО-А.

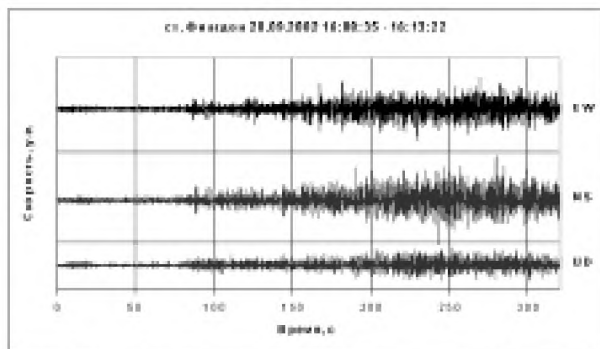


Рис. 2. Запись схода ледника Колка станцией Фиагдон*.

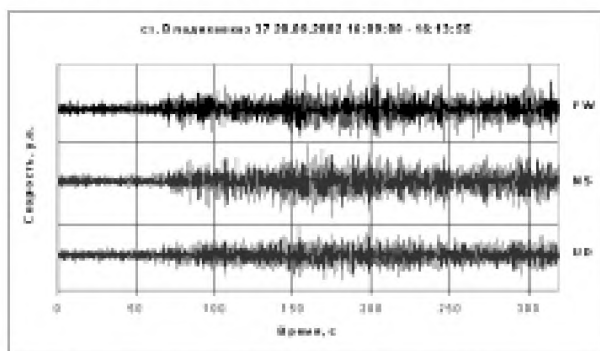


Рис. 3. Запись схода ледника Колка станцией Владикавказ 37.

нования ст.Заманкул являются конгломераты, перекрытые слоем элювия мощностью 2–3 м [3]. Необходимо уточнить грунтовые условия с помощью бурения скважин.

С целью корреляции инструментальных записей с процессом схода ледника были построены графики зависимости выделенной энергии от времени. Для более четкого выделения экстремумов было проведено сглаживание данных и фильтрация по высокочастотным составляющим (рис. 9–10).

Привязку к местности можно проводить по вектору наибольшего выделения энергии, а также по изменению угла между компонентами NS и EW. На всех записях направление преобладающего выделения энергии соответствует компоненте Север-Юг (NS), что подтверждает преобладающее движение ледовых масс (рис. 9–10).

В соответствие со схемой транзита ледника Колка (рис. 8) первое отклонение или само включение сейсмических станций можно связать с обвалом или обвалами ледовых масс висячего ледника с г.Джимарайхох на верхнюю часть ледника Колка (1), второе – с соударением ледово-каменной массы о правый склон транзита после прохождения ледника Майли (2), третье – с ударом ледовой массы по т.н. «Кармадонским воротам» (3).

Для изучения особенностей движения ледника Колка наиболее корректно сопоставление всех трех составляющих инструментальной трехкомпонентной записи ст. Фиагдон (рис. 2, начало записи), наи-

более близкой к месту расположению ледниковой массы до схода. Следовательно, в качестве исходных рассматриваются записи указанной станции. Очевидно, мы можем видеть только продолжение воздействия, которое включило станции (само запаздывание, очевидно, не превышает нескольких секунд). Ясно видно, что воздействие имеет отчетливую вертикальную составляющую. Но, при этом, амплитуда вертикальной составляющей раз в пять меньше горизонтальных. Другими словами, наблюдается преобладающее горизонтальное движение ледника в направлении NS и EW.

Таким образом, началу отсчета времени движения каменно-ледовой массы соответствует отметка – (1). Необходимо отметить, что дальше на записях отсут-

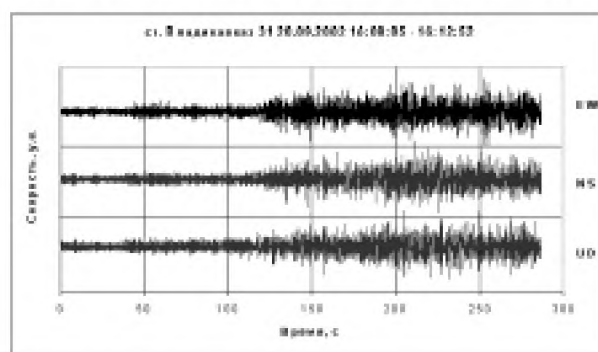


Рис. 4. Запись схода ледника Колка станцией Владикавказ 31.

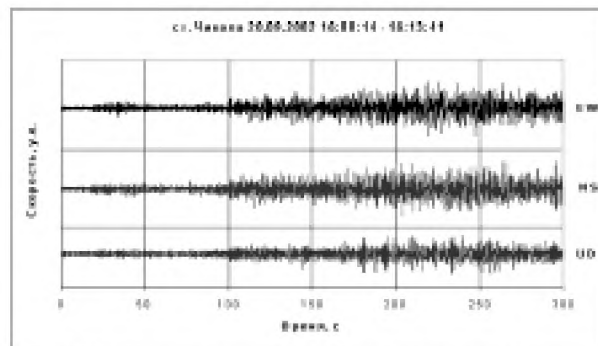


Рис. 5. Запись схода ледника Колка станцией Чиколы.

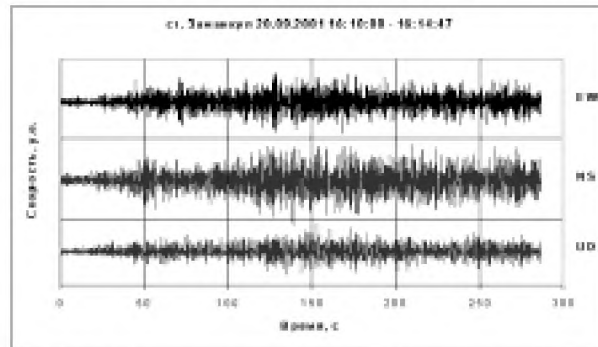


Рис. 6. Запись схода ледника Колка станцией Заманкул.

* Составляющие - UD - вертикальная, NS – Север-Юг, EW – Восток-Запад.

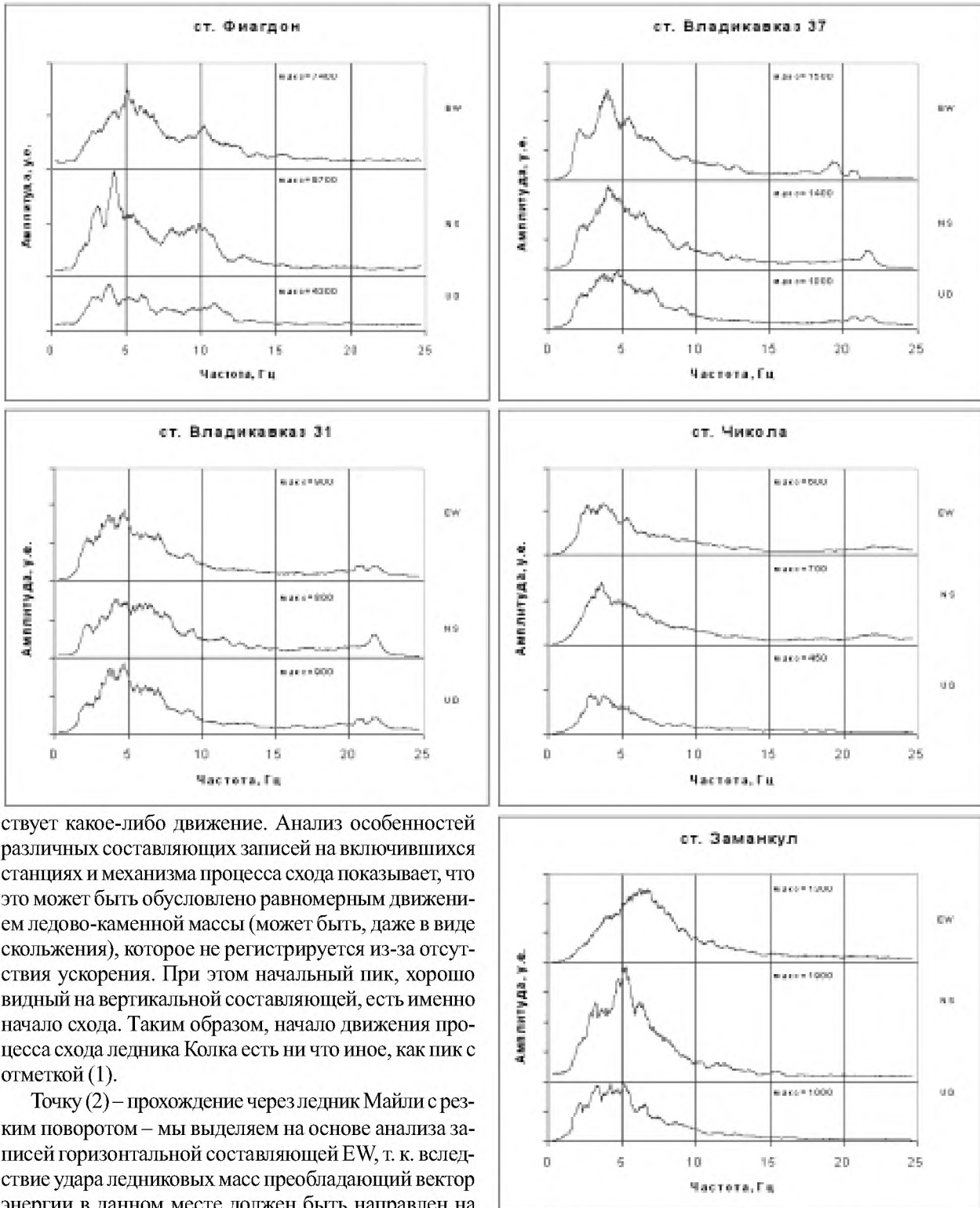


Рис. 7. Амплитудный спектр Фурье инструментальных записей схода ледника Колка.

ствует какое-либо движение. Анализ особенностей различных составляющих записей на включившихся станциях и механизма процесса схода показывает, что это может быть обусловлено равномерным движением ледово-каменной массы (может быть, даже в виде скольжения), которое не регистрируется из-за отсутствия ускорения. При этом начальный пик, хорошо видный на вертикальной составляющей, есть именно начало схода. Таким образом, начало движения процесса схода ледника Колка есть ни что иное, как пик с отметкой (1).

Точку (2) – прохождение через ледник Майли с резким поворотом – мы выделяем на основе анализа записей горизонтальной составляющей EW, т. к. вследствие удара ледниковых масс преобладающий вектор энергии в данном месте должен быть направлен на восток. При этом мы имеем торможение к источнику, но благодаря гравитационному ускорению равнодействующий вектор направлен вниз по его транзиту и руслу р. Геналдон.

Наибольшее выделение энергии наблюдается при торможении ледника в точке с отметкой (3). На рис. 9 ясно виден соответствующий пик на состав-

ляющей NS. Далее наблюдается движение следующей за фронтальной частью ледово-каменной массы.

Далее оценим скорость движения ледниковой массы. Учитывая, что расстояние до Майлийского поворота от середины (середины инерционной массы)



Рис. 8. Схема схода ледника Колка.

том рекомендаций геологов.

Исследование графиков показывает, что во время торможения «Кармадонскими воротами», где выделение энергии наибольшее, вначале произошел вертикальный удар (рис. 9, составляющая UD), очевидно, обусловленный падением передней части или фронта массы, а затем – горизонтальный NS (основное соударение). Указанный вертикальный удар произошел на расстоянии около 400 м до главного удара. Это можно объяснить выполаживанием в этом месте ложа р. Геналдон и т.п. Далее, через период времени около 4 с произошел удар о «Кармадонские ворота» с преобладающим движением на север. На составляющей NS ст. Фиагдон после основного удара отчетливо прослеживаются последующие волны. Достаточно большие амплитуды колебаний обусловлены: остановкой основной массы в районе «Кармадонских ворот», движением «хвоста» ледового потока, сходом грязе-селевого потока в направлении на север и т. п.

Для оценки времени прохождения ледово-каменной массы ледника по данным различных станций измеряли величину времени между соответствующими метками на исходной (Фиагдонской) записи и выделяли их на других записях. Следует отметить, что особенности выделенных метками точек надежно прослежи-

сформированного ледника равно 4 110 м и время прохождения – 80 с, средняя скорость на участке от метки 1 до метки 2 равна $V_{1,2}=180$ км/ч, и на участке от метки 2 до –3 при расстоянии, равном 13 450 м, и времени прохождения 150 с средняя скорость составит $V_{2,3}=320$ км/ч. В дальнейшем расстояние и соответственной скорости будут уточняться с учетом

рекомендаций геологов. Такой анализ с конца записей, в частности, показал, что есть станции (Владикавказ 37, Чикола и Заманкул), где начало процесса практически утеряно. Это обусловлено поздним срабатыванием триггеров удаленных станций из-за малого амплитудного уровня и других причин. В то же время благодаря этому была получена возможность регистрации продолжения движения уже после выключения других вовремя включившихся станций. Особо необходимо отметить неудовлетворительно организованную службу времени на всех станциях локальной сети на период схода ледника. Это значительно усложнило обработку данных и повысило величину погрешности. Кроме того, сеть характеризовалась на период схода ледника неудовлетворительной подборкой параметров срабатывания триггеров, нередко приводящей к отсутствию на записях землетрясений первых вступлений и т. д. [4].

СОБЫТИЕ, ПРЕДВАРЯЮЩЕЕ СХОД ЛЕДНИКА

Анализ данных, зарегистрированных сетью станций ГФЦЭД, показывает, что за 12 минут до схода ледника имело место событие, зарегистрированное только двумя станциями: Чикола и Владикавказ 31 и одной из четырех сейсмических станций «Института Гидропроект», расположенных на расстоянии около 36–40 км к западу-юго-западу от Геналдонского ущелья.

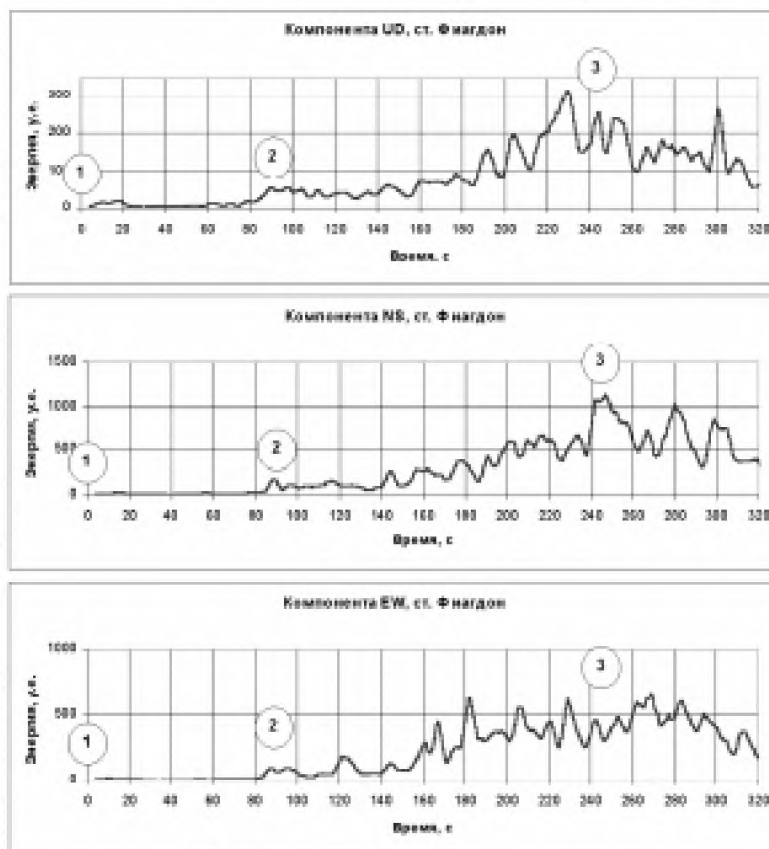


Рис. 9. Зависимость энергии от времени процесса схода, ст. Фиагдон.

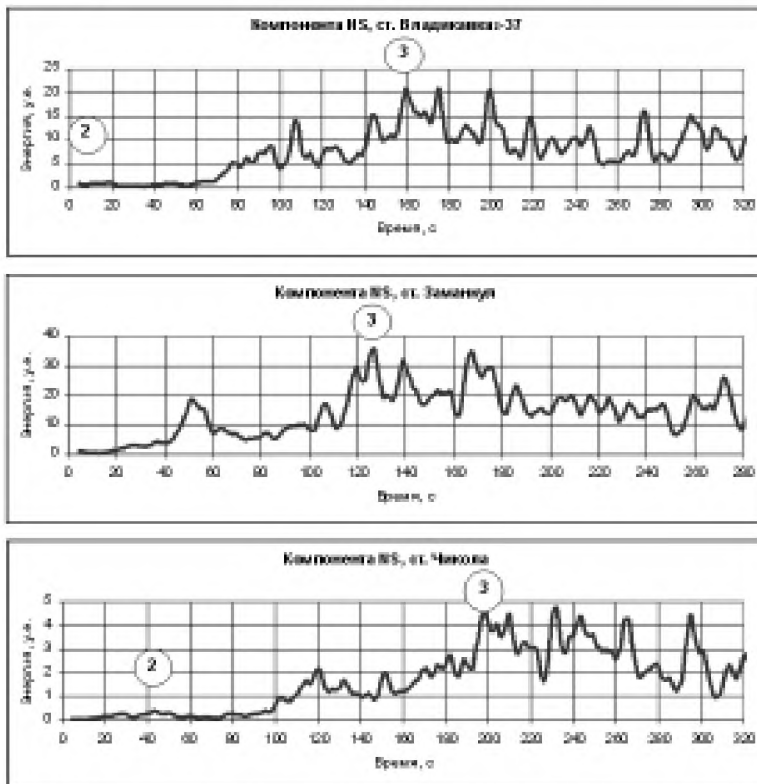


Рис. 10. Зависимость составляющей NS-вектора выделения энергии от времени.

При этом указанная станция АЦРСС № 11 располагалась на «узком мысу с крутыми обрывами к р. Ардон и р. Баддон на высоте 1624 м» [5] и, таким образом, была наиболее чувствительной [5].

Станция в Фиагдоне, расположенная (наиболее близко) в 18 км к северо-западу от Геналдонского ущелья, не включилась на указанное событие. Обе включившиеся станции ГФЦЭД Чикола и Владикавказ 31, очевидно, находились достаточно близко от источника колебаний (рис. 1). На это указывает, в частности, сопоставимость значений амплитуд по всем составляющим на записях обеих станций. Такое бывает при почти сферическом источнике, когда горизонтальные составляющие, как правило более низкочастотные и, отсюда, менее поглощаемые средой, не успевают на относительно малом расстоянии от источника превзойти амплитуду вертикальных колебаний.

Анализ спектрального состава зарегистрированных колебаний (рис. 12) показывает, что в спектре вертикальных колебаний ст. Чикола наблюдаются два почти равных по амплитуде пика, разнесенных на частотном диапазоне: один на частоте колебаний 1 Гц и второй – 8 Гц. При этом на спектрах обоих горизонтальных колебаний наблюдаются максимумы на частоте 1 и 5 Гц. В спектрах всех составляющих записей ст. Владикавказ 31 наблюдаются максимумы только на частоте 5 Гц. В то же время максимум спектра колебаний ст. АЦРСС № 11 «Института Гидропроект» составляет 0,81 Гц.

На основании вышеизложенного и других соображений это событие, на наш взгляд, является, скорее всего, технологическим взрывом. К сожалению, мы имеем только одну составляющую записи «Института Гидропроект». Это обстоятельство и отсутствие данных амплитудного уровня колебаний не позволяет установить предполагаемый эпицентр события. Мы надеемся, что вскоре, несмотря на существующие организационные сложности, эта задача будет решена. Строго говоря, нельзя также полностью исключить, что это событие было локальным землетрясением. Но для этого необходимо полностью проанализировать записи, полученные за указанный период сейсмическими станциями из сопредельных республике районов.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЯ СХОДА ЛЕДНИКА

Предварительная, на настоящее время, реконструкция события схода ледника на основе недостаточно полного материала выглядит следующим образом.

В течение последних 1–2 месяцев с г. Джимарай-хох могли иметь место неоднократные обвалы, обусловленные ослаблением выветрелой части горных пород и несколькими местными землетрясениями с магнитудами $M=3,9$ и $M=5,1$, интенсивность которых составляла 3–4 балла в районе ледника Колка. Ледник быстро набирал критическую массу. Могли иметь место ряд сопутствующих факторов (обводнение под ледником, подогрев и т.п.). На это указывает почти полное отсутствие трения и высокая скорость схода. Очередное событие, зарегистрированное за 12 минут до начала процесса схода (взрыв/землетрясение) двумя станциями ГФЦЭД и одной – «Института Гидропроект», очевидно, могло раскатать тело висячего ледника. Произошел обвал. Ледник Колка, достигший критической массы под воздействием очередного обвала (именно он обусловил включение сейсмических станций локальной сети ГФЦЭД, но не был записан), был буквально сдвинут со своего ложа (за несколько секунд до метки 1 на рис. 9–10). Далее ледник двинулся (заскользил) под воздействием гравитационной силы вниз по не особенно крутой поверхности со скоростью 180 км/ч. После удара о поворот у ледника Майли (метка 2 на рис. 9–10) ледово-каменная масса понеслась вниз со средней скоростью 320 км/ч на водной (может быть – водно-воздушной) подушке. Иначе трудно объяснить такую скорость. Удар о скалы «Кармадонских ворот» выделен меткой 3

(рис. 9–10). За 400 м до указанного удара имел место вертикальный удар, очевидно, обусловленный частичным обрушением фронтальной части ледово-каменной массы при выходе на равнину.

Для большей глубины анализа и обоснованности выводов необходимо:

- получение данных из сопредельных республике районов;
- уточнение данных грунтовых условий расположения сейсмических станций ГФЦЭД;
- анализ всех данных в их взаимосвязи.

ВЫВОДЫ

1. 20 сентября 2002 г. действующими станциями локальной сети Геофизического центра экспериментальной диагностики (Фиагдон, Заманкул, Чикола, Владикавказ 31, Владикавказ 37, Ардон) был зарегистрирован сход ледника Колка. Запись ст. Ардон, крайне неудачная, подлежит дальнейшей обработке и в работе не рассматривалась.

2. Получены уникальные данные цифровых записей схода ледника. Обработка и анализ данных показывает их соответствие основным этапам предполагаемого реконструированного сценария.

3. Проведены работы по установлению грунтовых условий сейсмических станций локальной сети ГФЦЭД по фондовым материалам. В дальнейшем предполагается детальное изучение грунтовых усло-

вий с помощью бурения скважин. Это позволит уточнить скоростную модель, принятую ранее для расчетов параметров землетрясений, и влияние грунтовых условий на волновые формы записей.

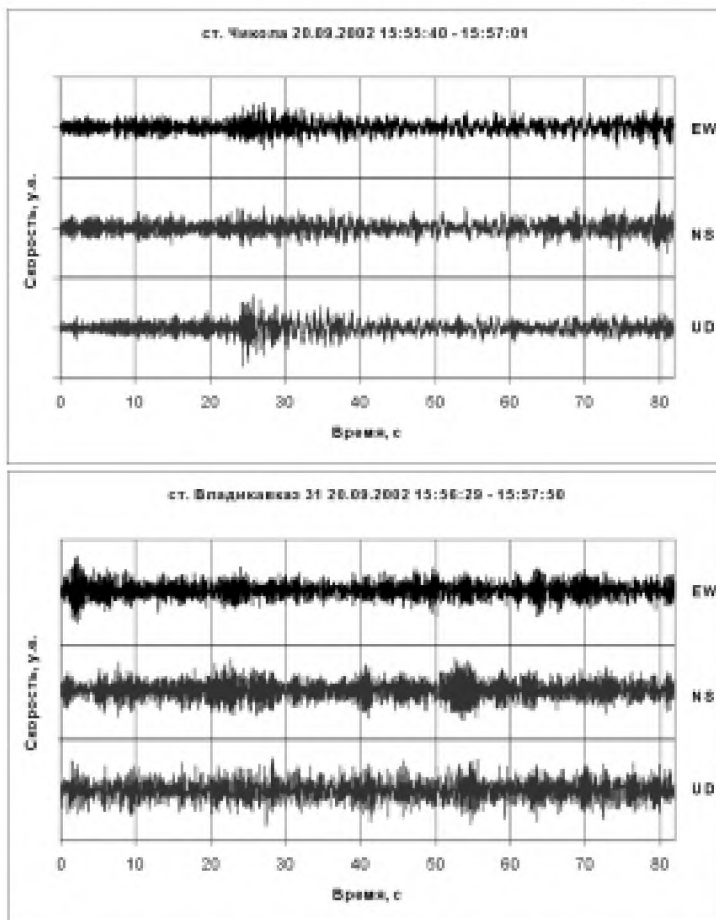


Рис. 11. Инструментальная запись предшествующего события на станциях ГФЦЭД.

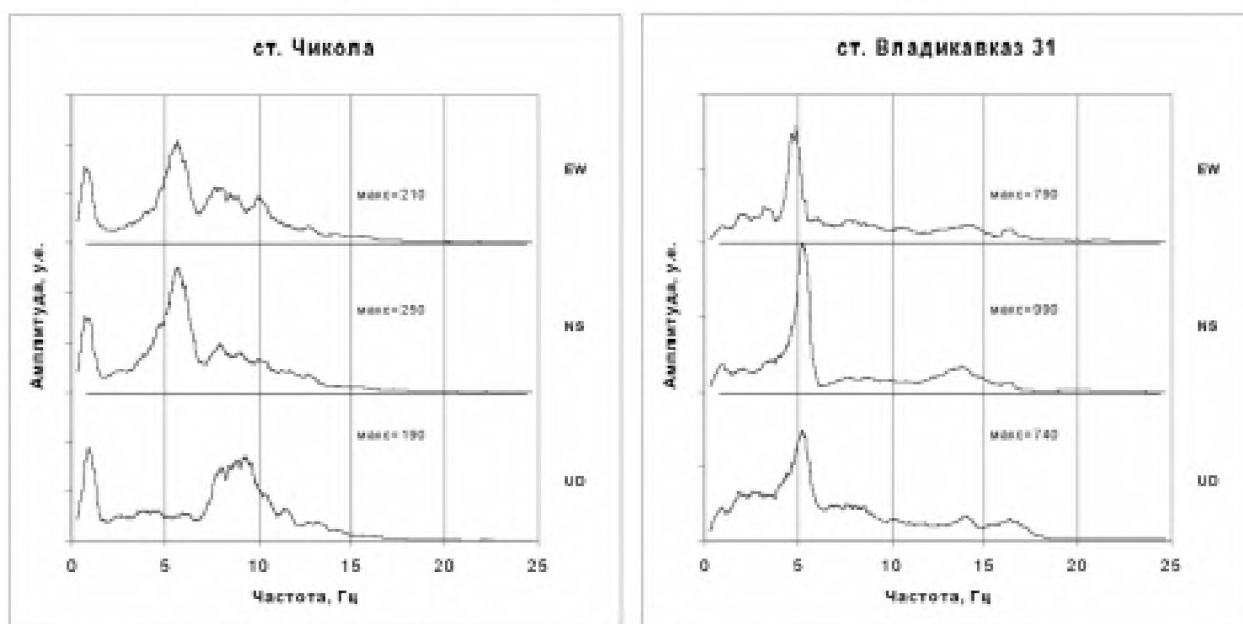


Рис. 12. Амплитудные спектры Фурье предшествующего события.

4. С целью локализации событий с юга предполагается установить сейсмическую станцию в с. Казбеги. Чтобы оконтурить Казбекский вулканический центр, необходима установка сейсмических станций южнее и восточнее г. Казбек.

5. Необходимо получить записи событий схода ледника из сопредельных республике районов и государств. Это позволит значительно уточнить сценарий происшедшего события.

6. Необходимо ускорить обработку инструментальных данных, сведенных в специальную базу данных за период, предшествующий и последующий катастрофическому сходу ледника.

7. На основе изучения и анализа дополнительных данных с сопредельных территорий уточнить наличие-отсутствие технологических взрывов за указанный период на территории республики и за ее пределами и возможность их локализации.

8. Построить механизмы очагов наиболее представительных событий в исследуемый период с помощью адаптации уже полученных передовых алгоритмов и программ, и реализуемых при помощи коллег из центральных научных учреждений РАН.

9. Особо следует отметить неудовлетворительно организованную службу времени на всех станциях локальной сети ГФЦЭД на период схода ледника. Это значительно усложнило обработку данных и повысило величину погрешности. Необходимо срочно улучшить ситуацию.

10. При действенной государственной поддержке на основе результатов исследования будут разработаны эталонные сценарии опасных проявлений рутинного функционирования природного процесса в районе Казбекского вулканического центра при совокупном воздействии внешних и внутренних факторов, а также в других районах республики.

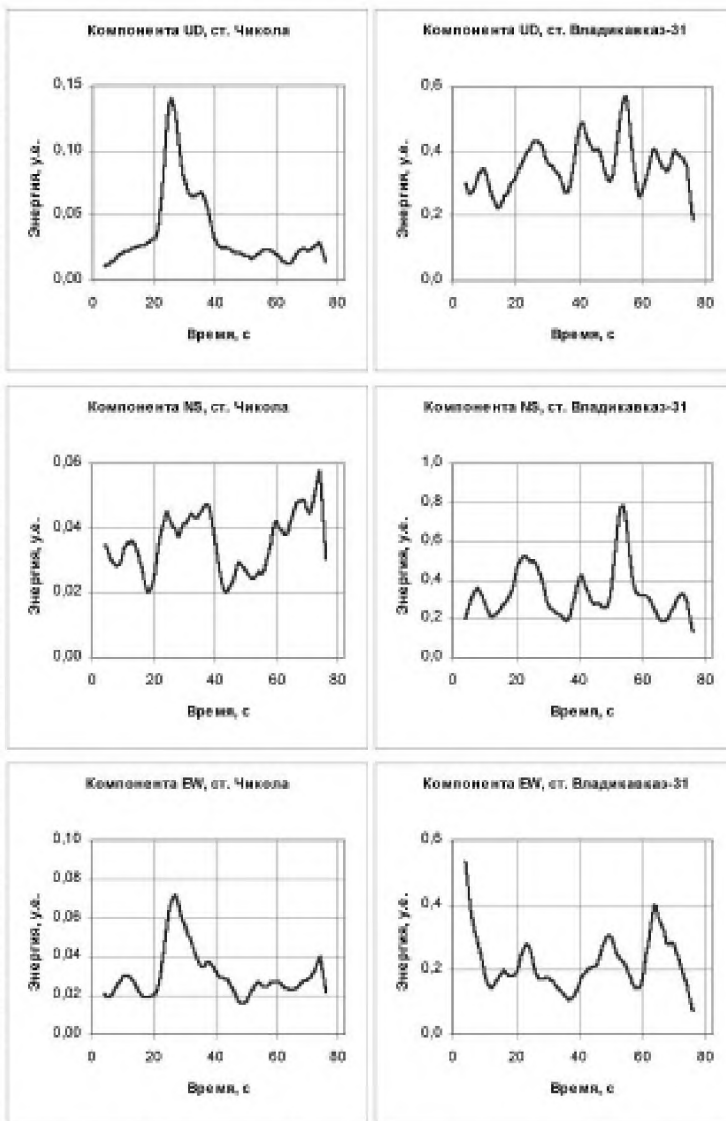


Рис.13. Записи колебаний предшествующего события.

11. Анализ вышеизложенного показывает, что исследование необходимо продолжить. В частности, необходимо провести полевые исследования в районе предполагаемых эпицентров сейсмических событий.

Литература

1. Заалишвили В.Б., Невская Н.И., Капуков Э.А., Ходов В.Э., Громова Н.А. Развитие существующей локальной сети сейсмических наблюдений на территории РСО-А и совершенствование обработки данных // Отчет Геофизического центра экспериментальной диагностики, 2003. 37с.

2. Заалишвили В.Б., Невская Н.И. Сбор и анализ сейсмограмм землетрясений (с определением их эпицентров), произошедших в сентябре и до сентября 2002г. // Комплексные геолого-геофизические исследования в Кармадонском ущелье Республики Северная Осетия – Алания / июль-август-сентябрь 2003г. Док. 41 с.

3. Особенности геологического строения и гидрогеологических условий участков расположения пунктов контрольного сейсмического наблюдения (ПКН) на территории РСО-А // Отчет Геофизического центра экспериментальной диагностики, 2003. 54с.

4. Протокол стажировки Невской Н.И. в ГС РАН. Центральная опытно-методическая экспедиция геофизической службы РАН, 2002. Док. 4 с.

5. Сейсмические записи движения Кармадонского ледника. ЦСГЕНЭО – филиал АО «Институт Гидропроект» // D:\User\ObjectZaramag\ПолМат092002Карм Ледник.doc. Док. 6 с.