

НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДИНАМИКОЙ ЛЕДНИКА НОРДЕНШЕЛЬДА СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

науч. сотр. В.Г. КОРОСТЕЛЕВ, д-р геогр. наук Л.М. САВАТЮГИН,
д-р физ.-мат наук В.Н. СМИРНОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: pvs@aari.ru

ВВЕДЕНИЕ

Ледник Норденшельда относится к выводным ледникам приливного типа, имеющим блочную структуру, обусловленную скольжением по наклонному ложу (рис. 1 а, б). Общее движение ледника представляет собой движение сложной системы блоков, взаимодействующих между собой, грунтом подстилающей поверхности (ложем) и с бортами (боковыми границами ледника). Такое движение ледника определяется термином глыбовое движение (Бадд, 1975; Патерсон, 1972).

Основным механизмом, вызывающим колебания ледника при его движении, являются силы трения вдоль границ ледяных блоков, бортов и ложа. Естественно

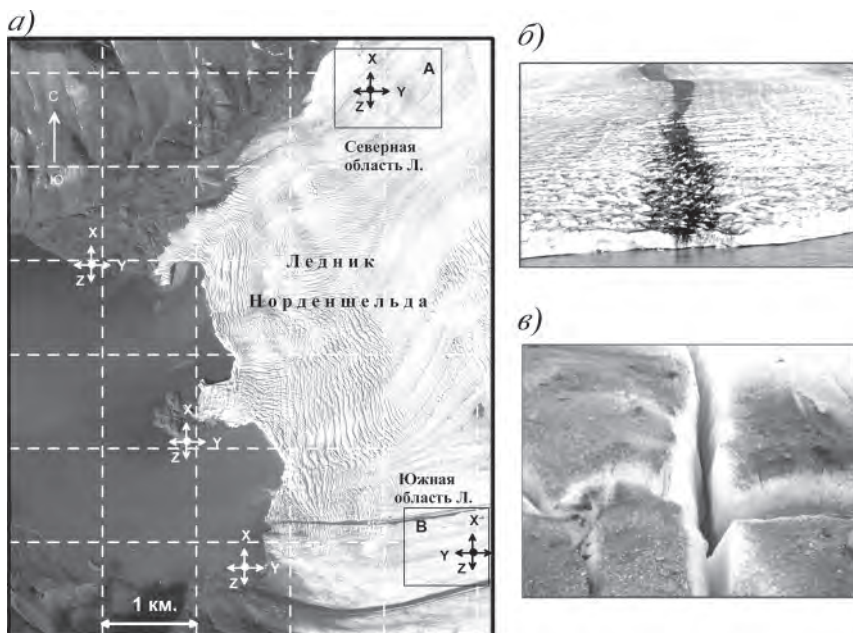


Рис. 1. Схема расстановки датчиков на поверхности ледника Норденшельда и береговой линии фьорда (а), вид на ледник со стороны фронта (б), разломы в леднике (в).

ожидать, что максимальная динамичность ледника будет проявляться при ускорении (или замедлении) его движения. При этом колебания блоков в период движения ледника обладают следующими особенностями: отсутствие восстанавливающих сил; сопротивление возмущающим силам имеется только со стороны ложа; существует нелинейность кинематических связей и граничных условий (квадратичная зависимость сил трения от скорости движения). Данные характеристики определяют движущийся ледник как нелинейную динамическую систему, в которой протекают процессы, описываемые нелинейными дифференциальными уравнениями.

В летний период через трещины и разломы в основание ледника постоянно поступает вода, образующаяся в процессе его таяния и размывающая края трещин и разломов. Ширина трещин и разломов, наблюдаемых в районе проведения работ, варьировалась от 10 до 50 см (рис. 1б).

Наличие довольно широких границ между блоками ледника в летний период, воды в трещинах и в основании (ледник — ложе) приводит к эффекту «смазки» и увеличению скорости движения ледника. Передача энергии от блока к блоку может происходить при воздействии импульсного источника силы в горизонтальной плоскости (подобно «принципу домино»), при этом в результате кратковременного контакта блоков между собой энергия передается по пространству в виде нестационарного импульса смещений льда в горизонтальной плоскости.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

В качестве датчиков при исследовании колебаний ледника использовались низкочастотные сейсмометры СМЕ4111, устанавливаемые на его поверхности. Регистрация сигналов производилась с помощью автономных сейсмических станций «Байкал-7HR». Методика наблюдений включала в себя регистрацию колебаний ледника в различных точках (рис. 1а). Конструкция и принцип действия сейсмометра позволяют регистрировать флуктуации скорости ледника в пределах его амплитудно-частотной характеристики (0,015–50 Гц). Отсутствие в конструкции сейсмометра механических элементов существенно снижает уровень собственных шумов на сверхнизких частотах, что дает возможность применять спектральный метод «восстановления истинного смещения почвы», описанный в работах (Гайзер, 1983; Феофилактов, 1977). Этот метод позволил получить значения флуктуаций скоростей и смещений ледника с периодом до 8 ч.

ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕДНИКА В ОБЛАСТИ ПЕРИОДОВ 0,5–8 ЧАСОВ

Из анализа структуры и спектрального состава фона колебаний поверхности ледника в двух точках (северная «А» и южная «В» точки, рис. 1а) отмечается:

- основная энергия колебаний поверхности ледника сосредоточена на частотах ниже 0,01 Гц (период $T = 100$ с);
- уровень амплитуд горизонтальных компонент колебаний (X, Y) на два порядка превосходит уровень амплитуд вертикальной компоненты (Z); это соотношение амплитуд колебаний сохранялось на протяжении всего периода наблюдений;
- характер и структура колебаний носят нелинейный характер, что приводит к «расслоению» спектра на множество гармоник (обертонов).

Учитывая нелинейный характер горизонтально поляризованных колебаний и невозможность существования чисто упругих колебаний ниже частоты 0,01 Гц, можно

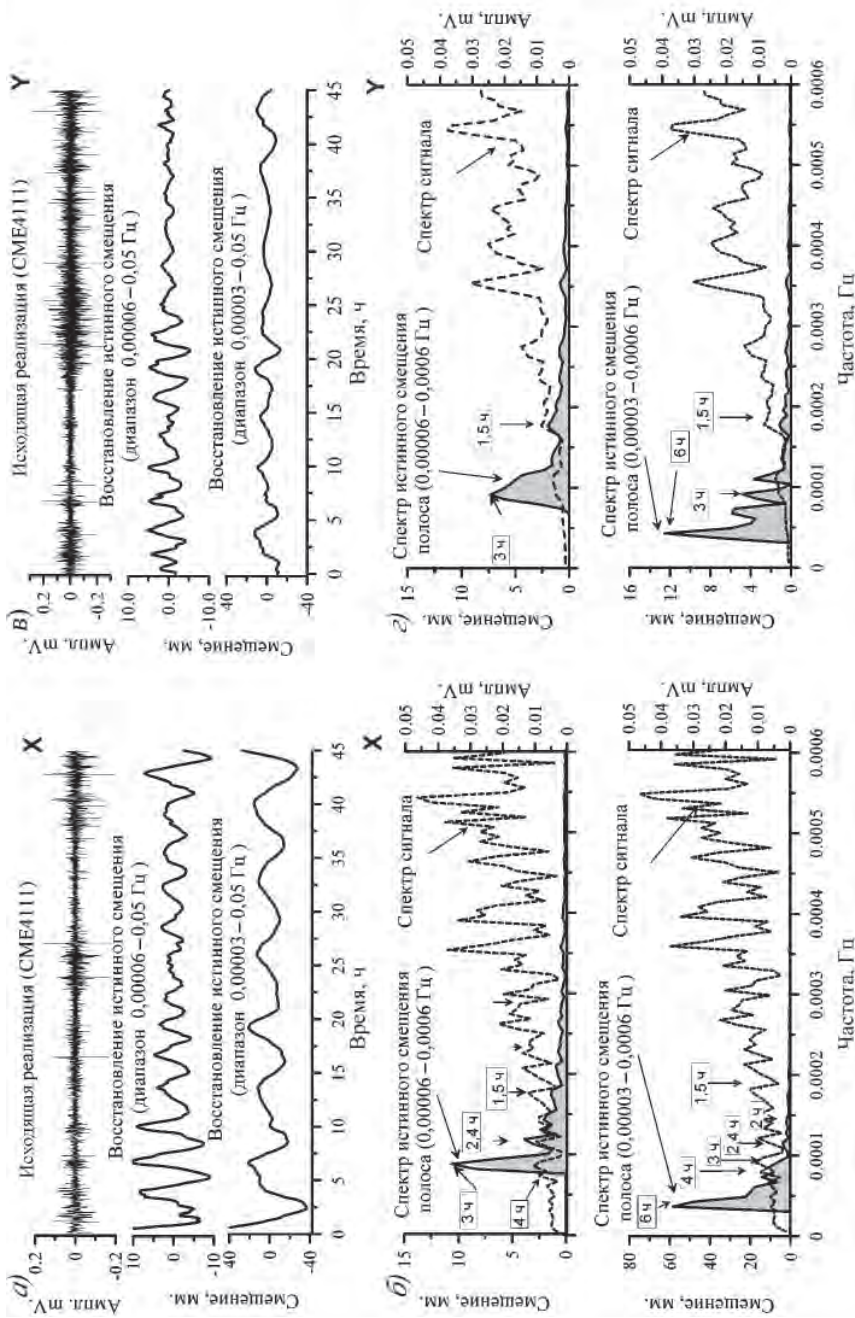


Рис. 2. Записи X- и Y-компонент колебаний поверхности ледника (А, В, рис. 1); расчетные значения смещений ледника в X- (а) и Y- (б) направлениях (С–Ю) и (В–З) в полосе частот 0,00006–0,0006 Гц ($T = 4,6-0,46$ ч), и в полосе частот 0,00003–0,0006 Гц ($T = 9,3-0,46$ ч); б, з — спектры истинных смещений и исходных записей колебаний ледника в указанных полосах частот.

предположить, что единственным источником нелинейных колебаний на сверхнизких частотах (в полосе 0–0,0006 Гц, диапазон периодов $T = 0–0,5$ ч) являлись флуктуации скорости движения при прерывистом смещении ледника вдоль ложа и бортов. Диапазон частот 0,0006–0,01 Гц представлен обертонами низкочастотных флуктуаций скорости движения ледника и процессом генерации колебаний на границах блоков при смещении их относительно друг друга. Ввиду того, что частотный диапазон флуктуаций скорости движения ледника находился в области «спада» амплитудно-частотной характеристики сейсмометра, к записям колебаний ледника в точках «А» и «В» была применена процедура «восстановления истинного смещения почвы». Одновременно с расчетом непосредственно смещений поверхности производился расчет значения истинной колебательной скорости движения ледника.

На рис. 2 приведены записи X (а) и Y (б) составляющих колебаний, зарегистрированных сейсмометром в течение 45 ч; частоты истинных смещений ледника располагались в полосе частот 0,00006–0,0006 Гц ($T = 4,6–0,46$ ч) и в полосе 0,00003–0,0006 Гц ($T = 9,3–0,46$ ч).

С целью контроля восстанавливаемых гармоник спектра истинных смещений на рис. 2а, б также представлены спектры колебаний блока ледника в соответствующих направлениях.

С целью выделения низкочастотных флуктуаций скорости движения ледника спектры колебательной скорости и смещений были построены по всей реализации длительностью 45 ч (область А, рис. 1а) при этом разрешающая способность спектра составила величину $\Delta f = 6,17 \cdot 10^{-6}$ Гц.

Спектральный анализ компонент колебаний ледника X и Y (рис. 2б, з) выявил целый ряд составляющих как в спектрах исходных рядов, так и в спектрах истинных смещений ледника в горизонтальной плоскости. Сопоставление частот колебаний показало, что они кратны некоторой основной частоте периодического процесса, т.е. являются гармониками (обертонами), характеризующими нелинейный характер колебаний.

Анализ частотного состава гармоник временных рядов показал, что основной процесс имеет период 6 ч, что соответствует первой гармонике периода полусуточного прилива. При этом в спектре горизонтальных колебаний ледника фиксируются гармоники, кратные процессам с периодами 6 и 3 ч.

Для установления факта наличия в общем спектре истинных низкочастотных колебаний с периодом 12 ч необходимо построение траектории движения ледника. Из теории и практики исследования нелинейных процессов хорошо известно, что значения амплитуд гармоник (обертонов) пропорциональны амплитуде основного процесса. Исходя из этого, изменение уровня колебаний гармоник со временем будет соответствовать изменению амплитуды основного процесса. В нашем случае рассчитать траекторию движения ледника можно по флуктуациям истинной скорости смещения, восстановленной в определенной полосе. Важно отметить, что «расщепление» спектра основного периодического процесса (в нашем случае $T = 12$ ч) на кратные гармоники возможно только в случае, если реакция ледника на внешнее гармоническое воздействие имеет нелинейный характер. Нелинейный характер флуктуаций скоростей поверхности ледника оказывает влияние на характер его движения по направлению к фьорду.

Известно, что движение льда в ледниках осуществляется двумя основными способами: путем вязкопластического течения и путем глыбового скольжения по ложу и внутрiledниковым разрывам и сколам (Шумский, 1969; Бадд, 1975).

Соотношение вязкопластического течения и глыбового скольжения в движении реальных ледников может быть самым разным. Лед в примерзших к ложу холодных ледниках может двигаться только за счет вязкопластических деформаций, тогда как ледники с водной пленкой на ложе в определенных условиях могут двигаться только путем глыбового скольжения (Шумский, 1962; Патерсон, 1972).

Скорость движения ледника формируется из двух компонент, постоянной и переменной:

$$\overline{U}(t_i) = \overline{V}_{\text{пост.}} + \overline{V}_{\text{пер.}}(t_i).$$

Величина скорости $\overline{V}_{\text{пост.}}$ зависит от сезона, ввиду этого под постоянной скоростью следует принимать ее среднее значение за несколько суток (5–8).

Постоянная скорость ($\overline{V}_{\text{пост.}}$) характеризует плавное скольжение ледника вдоль ложа под действием внутренних источников гравитационной энергии. Наличие вязко-упругой среды на границе «ложе–ледник» связано с проявлением пластических свойств льда, обусловленных его температурой и давлением массы льда на грунт (формирующий ложе).

Переменная составляющая скорости $\overline{V}_{\text{пер.}}(t_i)$ зависит от морфологии ложа, наличия касательных напряжений между нижней поверхностью ледника и ложем. Диссипация энергии трения вдоль указанных границ может привести к реализации механизма прерывистого скольжения («stick-slip»).

Флуктуации скорости движения зависят и от внешних факторов, к которым в первую очередь следует отнести существенные изменения температуры воздуха. Постоянное периодическое воздействие на ледник оказывают приливообразующие силы.

При проведении расчета траекторий движения блоков ледника (на которых устанавливался сейсмометр) значения $\overline{V}_{\text{пост.}}$ принималось равным нулю (т.е. не учитывалось движение ледника под действием гравитационных сил). Исходя из этого в качестве величины общей скорости движения ледника $\overline{U}(t_i)$ в случае, когда $\overline{V}_{\text{пост.}} = 0$, принимались значения $\overline{U}(t_i) = \overline{V}_{\text{пер.}}(t_i)$.

Ввиду того, что ледник характеризуется как динамическая блочная структура следует ожидать, что характер движения и направление вектора скорости в различных точках ледника будут разными. Проведем расчет и построение траекторий движения ледника в областях А и В (рис. 1а). Расчет траекторий движения ледника производится только на основе результатов регистрации низкочастотных колебаний. Методика построения траекторий движения в точках состояла из следующих этапов:

- восстановления истинных значений колебательной скорости и смещений движения поверхности ледника в заданной полосе частот;
- расчет флуктуаций скоростей;
- построение временных рядов, характеризующих величину смещений (на момент времени t_i) вдоль направлений X и Y, по формулам:

$$L_x(t_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i \Delta V_x(t_j) \cdot \Delta t,$$

$$L_y(t_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^i \Delta V_y(Y) \cdot \Delta t.$$

На рис. 3 (а–д) приведены результаты расчета значений смещений в направлениях X и Y (для северной и южной областей ледника). При этом регистрация

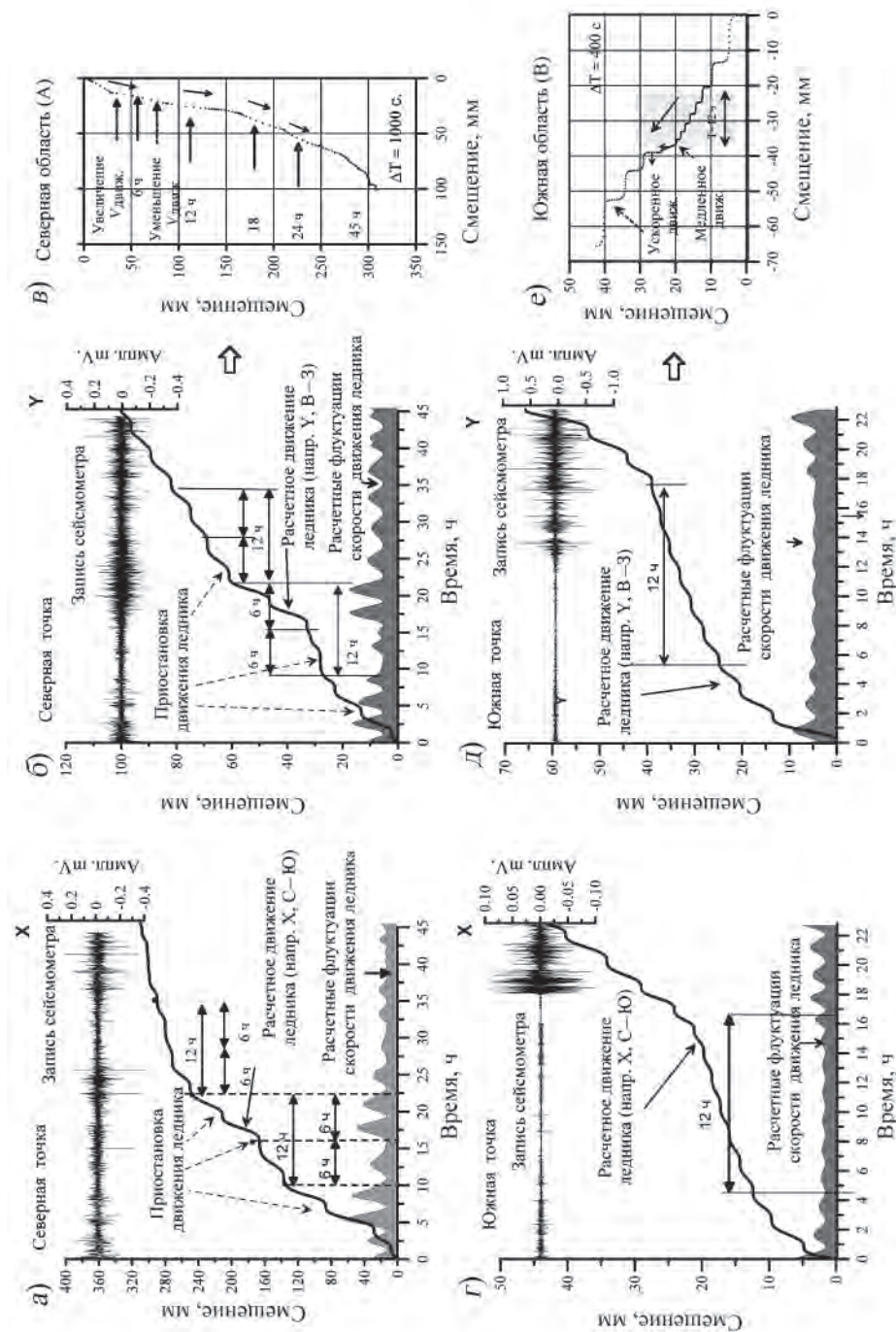


Рис. 3. Расчетные зависимости $L_x(t)$ и $L_y(t)$ для северной А (а, б) и южной В (в, д) областей ледника (рис. 1а), траектории движения блоков ледника (е, е).

колебаний производилась последовательно одним и тем же сейсмометром (северная точка, южная точка).

При рассмотрении и сопоставлении рисунков можно отметить, что движение ледника в направлениях X и Y как в северной (рис. 3а, б), так и в южной областях ледника (рис. 3г, д) носит прерывистый характер. Отмечается скрытая периодичность процесса движения длительностью 12, 6 и 3 ч (рис. 3).

Пульсация скорости движения ледника длительностью 12 ч фиксировалась в северной и южной областях в разные периоды проведения работ. Из этого можно сделать вывод: процесс с периодом 12 ч является внешней силой, воздействующей на ледник, и причиной флуктуации скорости. Приливные явления в леднике обусловлены не морскими приливами, а являются реакцией массы льда на приливообразующую силу Луны.

На рис. 3 приведены траектории движения блоков ледника в северной (в) и южной (е) областях ледника, траектории представлены точками. Плотность точек характеризует величину скорости ледника на определенном отрезке. Интервал времени между соседними точками в северном районе — $\Delta T = 1000$ с, а в южном — $\Delta T = 400$ с. Значения интервалов времени между положениями соседних точек выбирались исходя из длительности регистрации колебаний ледника (в северной области — 45 ч, в южной — 22,5 ч).

Значения смещений, представленных на рис. 3, не являются истинными, а прямо пропорциональны им. Это связано с тем, что величина амплитуды составляющей спектра колебаний с периодом 12 ч получена не прямой регистрацией процесса, а расчетом уровня амплитуды флуктуаций скоростей для гармоник более высокого порядка. Интенсивность гармоник (обертонов) меняется синхронно с основной частотой, но с меньшей амплитудой.

Из рисунка видно, что участки, соответствующие ускорению и замедлению движения ледника в его различных точках (рис. 3в, е), фиксировались датчиком с интервалом во времени 12 и 6 ч. Флуктуации с меньшим периодом практически не видны. Высшие гармоники с относительно небольшим периодом колебаний (менее 0,8 ч) хорошо фиксируются сейсмометром. При этом амплитуда высших гармоник на два порядка выше основной частоты колебаний. Конфигурации точек траекторий движения ледника в северной и южных областях явно отличаются друг от друга (рис. 3в, е). Известно, что направление движения ледников в разных областях отличается от общего «генерального» направления перемещения масс льда. Морфология поверхности ледника зависит от морфологии подстилающей поверхности (ложа), ориентация и ширина разломов определяется рельефом ложа. Направления протяженных разломов ледника, как правило, перпендикулярны линии максимального уклона ложа. Траектории движения ледника в областях А и В (рис. 3в, е), вероятно, формировались ориентацией разломов и трещин в районе установки сейсмометра.

ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЕДНИКА В ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ 4 ЧАСА

На рис. 4 приведены записи компонент колебаний (X, Y), зарегистрированных в период смещения блока ледника в течение 4 ч. Одновременно с записью колебаний представлены истинные значения скорости смещения поверхности блока ледника в диапазоне частот более 0,005 Гц (ВЧ-диапазон) и на частотах < 0,005 Гц (НЧ-диапазон). Расчет значений смещений блока в направлениях X и Y производился по флуктуациям скорости горизонтальных колебаний в НЧ-диапазоне.

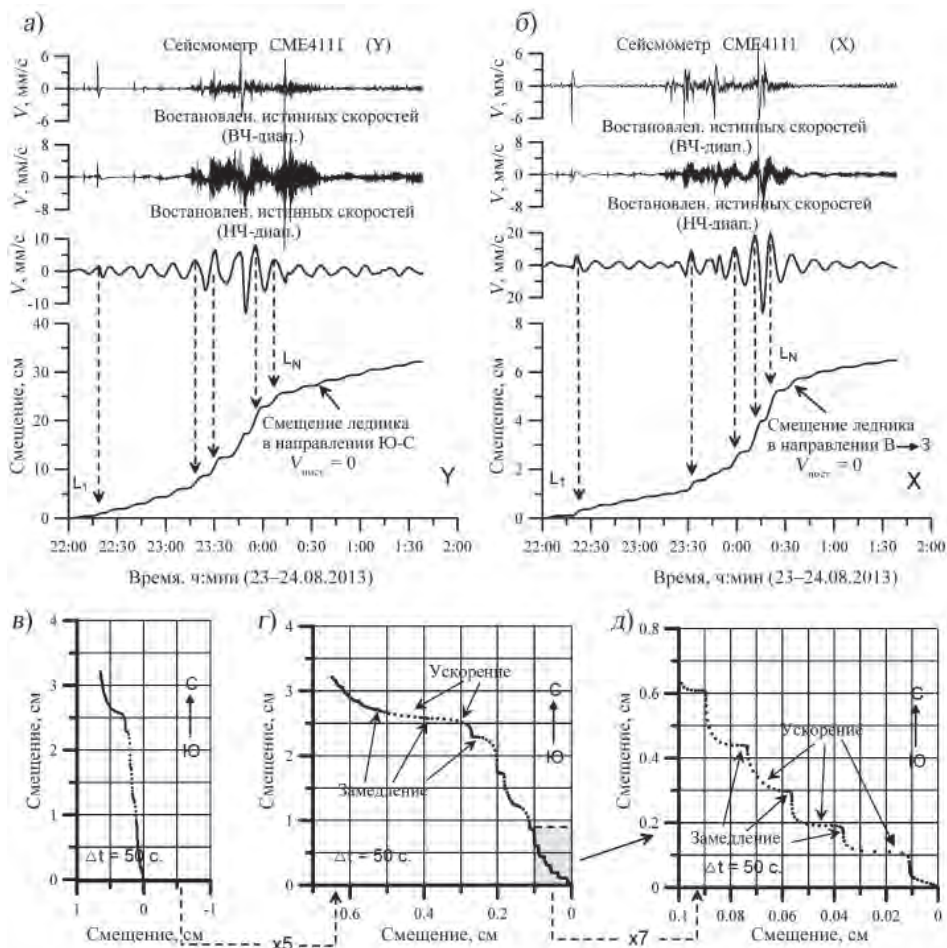


Рис. 4. Записи компонент горизонтально-поляризованных колебаний и расчетные значения истинной скорости смещения и перемещений блока ледника в направлениях Y (a) и X (b): a — траектория движения блока в интервале времени 4 ч; b — траектория движения при увеличении масштаба в направлении X ; c — фрагмент траектории с минимальными значениями смещений. Для наглядности представлен разновеликий масштаб.

На построенных зависимостях значений смещений от времени в направлениях X и Y отмечается наличие процесса прерывистого скольжения с периодом 12–13 мин. Сопоставление моментов максимальной флуктуации скорости движения (точки L_1, \dots, L_N , рис. 4а, б) с расчетными значениями истинных скоростей (ВЧ-диапазон) и записями сейсмометра (X , Y) указывает на соответствие данных моментов со временем интенсивной генерации колебаний.

На графике рис. 4в, д, характеризующем траекторию движения блока (в течение 4 ч), отмечается наличие участков замедления и ускорения движения. При этом рассматриваемая траектория движения является составным элементом низкочастотной флуктуации смещения в более существенном временном и пространственном масштабе. Для наглядности процесса смещения блока в направлении $B \rightarrow 3$ (на фронт ледника) масштаб графика по оси X увеличен в 5 раз. Как и в предыдущем случае

(рис. 3), характер движения блока представляет собой процесс прерывистого скольжения, состоящего из последовательных этапов ускорения и замедления движения. При скольжении с цикличностью 2,5–3 ч смена направлений движения X (в сторону фронта) и Y (перпендикулярно языку) происходила последовательно, формируя «ступенчатый» характер траектории. Движение блока с гораздо меньшими скоростями, чем основная подвижка блока, также носит прерывистый характер, но с существенно меньшими значениями смещений (прямоугольник, рис. 4г, д).

ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ БЛОКА ЛЕДНИКА В ИНТЕРВАЛЕ ВРЕМЕНИ 1,4 ЧАСА

Рассмотрим характер смещений блока ледника в меньшем временном интервале (~1,4 ч). Выберем участок с существенной интенсивностью генерации колебаний в период быстрой подвижки блока ледника (этап ускоренного скольжения). В реализациях такой длительности низкочастотные процессы ($T > 2$ ч) представлены в виде тренда, искажающего результаты расчета траектории в рассматриваемом интервале времени. Вследствие этого факта из рассматриваемых временных рядов удалялся низкочастотный тренд.

На рис. 5а, б приведены восстановленные записи колебательной скорости в широкой полосе частот: в диапазоне частот 0,0004–0,009 Гц (ФНЧ, $F_{\text{ср.}} = 0,009$ Гц), НЧ-флуктуации скорости движения блока и зависимость смещения блока в направлениях X и Y. Построенная траектория смещения блока в интервале $\Delta T = 1,4$ ч

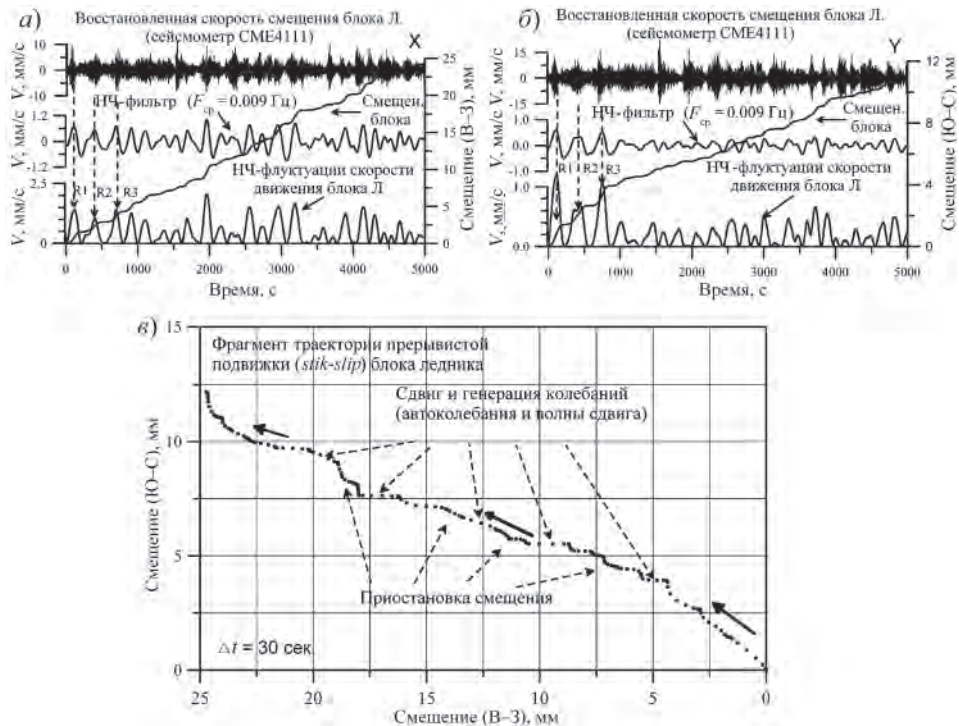


Рис. 5. Восстановленные записи колебательной скорости в широкой полосе частот: в диапазоне частот 0,0004–0,009 Гц (ФНЧ, $F_{\text{ср.}} = 0,009$ Гц), НЧ-флуктуации скорости движения блока и зависимость смещения блока в направлениях X и Y (а, б), в — траектория движения блока ($\Delta T = 1,4$ ч).

так же, как и в предыдущем случае ($\Delta T = 4$ ч, рис. 4), имеет ступенчатый характер и формируется последовательностью этапов ускоренного и замедленного движения. При этом максимальная по интенсивности генерация колебаний соответствует этапам ускоренного скольжения.

Восстановленные записи компонент колебаний (X , Y) представляют собой последовательность цугов автоколебаний с относительно устойчивой периодичностью (~ 4 мин) и значений амплитуд колебательной скорости (рис. 5а, б).

Рассмотренный характер движения блока ледника представляет собой иерархически организованную структуру. Самоподобие временных рядов, характеризующих смещение блоков ледника, проявляется в периодических процессах (прерывистое скольжение типа «stick-slip») в широком спектре временных масштабов от нескольких минут до десятков часов.

ВЫВОДЫ

В результате проведения исследований в периоды июль–август 2012 и 2013 гг. низкочастотных колебаний поверхности ледника Норденшельда с применением методов сейсмометрии установлено:

- движение ледника в период его активного таяния (июль–август) носит прерывистый характер, цикличность смещений ледника соответствует периоду полусуточного прилива (12 ч);

- наличие в спектре колебаний блоков ледника составляющих, соответствующих обертонам полусуточного прилива, указывает на механизм нелинейного взаимодействия вдоль границ «ложе–ледник» и «блок–блок»; нелинейность процессов обусловлена наличием диссипации энергии при трении основания ледника о каменистый грунт ложа и вдоль границ смежных блоков ледника;

- траектории движения блоков ледника обусловлены морфологией подстилающей поверхности (ложа) и ледника;

- характер движения конкретного блока ледника представляет собой прерывистое смещение массы льда вдоль естественных границ (сквозные разломы, основание ледника и ложа);

- траектория движения блока ледника представляет собой иерархическую временную структуру, сопровождающуюся ступенчатым характером смещения блока в разных по длительности интервалах времени;

- сквозные разломы, являющиеся границами блоков ледника, представляют собой зоны активной генерации автоколебаний и деформационных волн сдвига;

- генерация автоколебаний и волн происходит в течение элементарных периодических смещений блока ледника длительностью 2–3 мин. относительно смежного блока и подстилающей поверхности — грунта, формирующего ложе ледника.

Значения флуктуаций скорости движения ледника, полученные с помощью сейсмического метода, не учитывают значение постоянной составляющей скорости, обусловленное пластическим течением льда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные процессы прерывистого скольжения в леднике характеризуют движущийся ледник как нелинейную диссипативную систему со всеми присущими ей свойствами (Малинецкий, Потапов, 2000). Общее движение ледника является таким же неустойчивым скольжением в системе ансамбля блоков ледника, как и движение

отдельного блока, но в существенно большем временном масштабе. При этом оно обладает всеми признаками автоколебаний, которые являются внутренним свойством системы, а ритм движения контролируется самой системой, а не внешним воздействием.

Разломные зоны ледника непрерывно подвергаются внешним и внутренним воздействиям полей гравитационных напряжений, динамических нагрузок в результате действия приливообразующих сил. Сквозные разломы являются активными, нелинейными и неустойчивыми средами. Поэтому из общих физических закономерностей нелинейных процессов следует, что в разломах возможна генерация автоколебаний и автоволн. Генерация деформационных автоволн может быть вызвана относительным перемещением смежных блоков в разломных зонах (Быков, 2000).

Основным направлением в тектонофизике на данный момент является исследование деформационных свойств границ между блоками земной коры разных иерархических уровней. При этом детально изучается нелинейный характер деформирования межблоковых промежутков. Идея использования результатов регистрации колебаний и смещений поверхности блоков ледника как модели поведения блоков земной коры в районе разломных зон является весьма перспективной. Перспективность заключается в существенном уменьшении как пространственных, так и временных масштабов явлений, протекающих на стыках блоков земной коры. Учитывая самоподобие (фрактальность) соответствующих процессов, временной масштаб явлений в случае использования ледника как модели уменьшается на несколько порядков, что дает возможность получения устойчивых статистических характеристик того или иного процесса (Соболев, 1993).

С точки зрения теории динамических диссипативных систем динамика ледников (Шумский, 1969; Бадд, 1975; Патерсон, 1972) является частным случаем и описывает движение масс льда в довольно длительных интервалах времени. Законченной нелинейной модели движения ледника на данный момент не существует ввиду того, что сама теория диссипативных динамических систем находится на этапе развития.

Проскальзывание по готовому разлому (явление «stick-slip») и связанные с ним сейсмические явления, к числу которых следует отнести автоколебания, дают возможность создать систему контроля движения ледника (мониторинга).

Основа любого геофизического мониторинга, проводимого в натуральных условиях, — это непрерывный контроль параметров, устойчивость к воздействию внешней среды, оперативность передачи данных об аномалиях в регистрации исследуемых характеристик среды. Важными факторами в организации системы контроля движения ледника являются:

- простота и относительная дешевизна используемого оборудования;
- длительность работы в автономном режиме;
- организация устойчивого автономного канала передачи информации;
- наличие готовых дублирующих систем на случай чрезвычайной ситуации, обусловленной природными факторами;
- знание полосы частот возбуждения автоколебаний в период смещения блоков ледника позволяет проводить контроль активного движения ледника не по записи датчика, а по уровню сигнала, зарегистрированного в узкой полосе частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бадд У. Ф. Динамика масс льда. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 235 с.

- Быков В.Г.* Волны активизации разломов земной коры // Тихоокеан. геология. 2000. Т. 19. № 1. С. 104–108.
- Гайзер В.М.* Определение истинного смещения почвы по записям сильных движений в ближней зоне землетрясений и взрывов // Физика сейсмических волн и внутреннее строение земли. М.: Наука, 1983. С. 37–49.
- Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.* Современные проблемы нелинейной динамики. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 336 с.
- Патерсон У.* Физика ледников. М.: Мир, 1972. 312 с.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 392 с.
- Феофилактов В.Д.* Помехи в длиннопериодной сейсмометрии. М.: Наука, 1977. 98 с.
- Шумский П.А.* К теории движения и колебаний ледников // Материалы гляциол. иссл. Хроника обсуждения. 1962. Вып. 6. С. 276–277.
- Шумский П.А.* Динамическая гляциология. М.: ВИНТИ, 1969. 172 с.