

## РОССЫПЕОБРАЗУЮЩИЕ ПОТОКИ И СЕЛИ КАК ВЯЗКИЕ ПОТОКИ В РЕЧНЫХ ДОЛИНАХ

А.А. Буйских

*Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,  
685000, Магадан, Портовая, 16, Россия*

Рассмотрены геологические процессы, протекающие в речных долинах, — перемещение аллювиальной россыпи и селевого потока. Последние представлены в форме вязких жидкостей. На основе модельного подхода изучена динамика распределения минерала россыпи и грязекаменного материала в речной долине. Перемещающийся материал исследован как самостоятельный поток твердых частиц (твердый поток), свободный от вмещающих пород. Взаимодействие потока с внешней средой задавалось массовыми силами, силами трения через источники-стоки вещества. Для математического описания твердого потока использовалась система уравнений течения вязкой жидкости. Полученные в ходе численных экспериментов параметры россыпи и селя удовлетворительно близки к натурным данным для реальных объектов.

*Аллювиальная россыпь, ледово-водно-каменный селевой поток, р. Геналдон, численное моделирование, уравнения вязкой жидкости.*

## PLACER-FORMING FLOWS AND MUDFLOWS AS VISCOUS FLUIDS IN RIVER VALLEYS

A.A. Buiskikh

The paper is concerned with geologic processes in river valleys, such as the movement of alluvial placers and mudflows, regarded as viscous fluids. The dynamics of distribution of the placer mineral and mud-and-gravel material in a river valley was studied by modeling. Moving material was examined as an independent flow of solid particles (solid flow), free of the enclosing rocks. The flow–environment interaction was specified by mass forces, friction forces, and substance sources (drains). For the mathematical description of a solid flow, a set of viscous-liquid equations was used. The placer and mudflow parameters obtained during the numerical experiments agree satisfactorily with the full-scale data for real objects.

*Alluvial placer, ice–water–rock flow, numerical simulation, viscous-liquid equations, Genaldon River*

## ВВЕДЕНИЕ

В ходе геологической эволюции горных рельефов постоянно происходила смена неравновесного и равновесного состояния таких сложных структурных элементов, как речные долины. Регулятором этой смены, их скоростью и продолжительностью выступали экзогенные и эндогенные факторы не только местного масштаба, но и глобальные, космические. Интенсивность эрозии и денудации, наличие и количество воды в разных формах играли определяющую роль в скорости перемещения горного материала по речной долине.

В данной работе рассматриваются два существенно различных по временным масштабам геологических тела: ледово-водно-каменный селевой поток и аллювиальное россыпное месторождение золота. Россыпи могли формироваться на интервалах времени в десятки и сотни тысяч лет. Все, что связано с процессами образования селевых потоков, укладывается в интервалы времени продолжительностью в минуты и часы. Для проведения численных экспериментов с моделями объектов такого типа требовался определенный объем исходной информации геологического и геокриологического характера. Удовлетворили этому условию два объекта: катастрофический ледяной селя, пронесшийся в долине р. Геналдон в Северной Осетии, и отработанные россыпные месторождения золота в Магаданской области [Гончаров и др., 2002; Литвиненко, 2002; Мавлюдов, 2011].

В настоящее время только Северо-Восточные регионы России продолжают давать ежегодно по 7—11 т россыпного золота [Золото..., 2012]. В 2013 г. на территории Магаданской области его добыто 13.4 т [Митькин, 2014].

Результаты теоретических исследований различных фаз формирования россыпных месторождений, их динамики отражены в многочисленных работах [Билибин, 1955; Карташов, 1972; Трофимов,

1980; Шилов, 2000; Гольдфарб, 2009; Корчуганова, 2010]. В ряде публикаций приводятся простейшие эмпирические формулы распределения россыпи вдоль речной долины [Трушков, 1975; Шилов, 2000; Самусиков, 2000]. Различные точки зрения на решение проблем перемещения частиц золота водным потоком и речными наносами представлены в [Трушков, 1975; Филиппов, 1999; Виноградова, Хмелева, 2009]. Большой перечень вопросов, связанных с динамикой россыпных месторождений, рассмотрен в работах [Шилов, 2000; Гольдфарб, 2009], где, в частности, обсуждается ранее высказывавшееся мнение о невозможности перемещения россыпного золота вдоль речной долины вместе с влекомыми наносами. Тяжелые частицы золота должны быстро «проваливаться» вниз в периоды перехода донных отложений речного русла во взвешенное состояние. Однако морфоструктурный анализ частиц золота и многочисленные физические эксперименты убедительно показали подвижность россыпи золота вдоль речной долины [Филиппов, 1999; Виноградова, Хмелева, 2009].

По своим основным параметрам — скорости, мощности потока (здесь высота волны), плотности, перемещенным объемам ледово-каменной массы — Геналдонский ледяной сель был отнесен к ультра-селевым [Петров, 2012]. Результаты его инструментального изучения изложены в [Поповнин и др., 2003; Мавлюдов, 2011; Петраков и др., 2013]. Математическому моделированию селевых потоков посвящен ряд работ, в которых модели строятся на основе методов статистической обработки натуральных данных (входные параметры считались случайными и нормально распределенными) [Божинский и др., 2002], законов сохранения количества движения и массы (динамики сечения потока, но без учета вязкости) [Такабаев, 1996; Яхияев, 2008], ньютоновского движения и взаимодействия отдельных частиц [Черноморец, Михайлов, 2012].

Поиск решения проблем, связанных с процессами генезиса россыпей и прохождения селевых потоков, может способствовать в первом случае повышению эффективности золотодобычи, во втором — минимизации экологического и экономического ущерба.

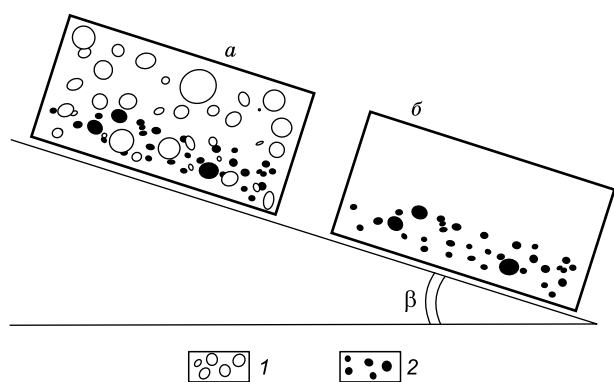
### ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ ТВЕРДОГО ПОТОКА

Перемещение по дну долины рассматриваемых геологических тел происходит с участием силы гравитации и текучей воды. В случае россыпи движение частиц минерала происходит скачками за счет периодического преобразования русла, действия паводков и перераспределения импульсов между частицами влекомых наносов. В аллювиальной фазе россыпь может находиться в подвижном состоянии десятки и сотни тысяч лет, проходя путь в несколько километров. Селевой поток изначально обладает огромным запасом кинетической энергии, которая частично расходуется по мере продвижения его по дну долины. Если уклон дна достаточно велик, то скорость потока может возрастать, а сам поток еще более увеличивать свою кинетическую энергию. При этом селевой поток, состоящий из воды, льда, глыбового материала и более тонких фракций пород, в определенных случаях можно рассматривать практически как однородный за счет активной турбулентности.

Теоретические основы процессов переноса в руслах и на склонах долин приведен в многочисленных публикациях [Маккавеев, Чалов, 1986; Эглит, 1986; Эрозия..., 2001; Ларионов и др., 2008; Чалов и др., 2008; Виноградова, Хмелева, 2009]. К настоящему времени с помощью физического и математического моделирования выведены эмпирические закономерности отдельных фаз руслоформирующих процессов. Несмотря на это, вопросы прогноза остаются открытыми, так как в этой области моделирования существенную роль играют, во-первых, сочетания множества факторов, участвующих в руслоформировании, переменность их во времени и взаимозависимость, во-вторых, обязательное присутствие в расчетных схемах стохастических элементов. Анализ факторов, обеспечивающих процессы руслового переноса, в том числе играющих определенную роль в формировании аллювиальных россыпей, выполнен в работах [Карташов, 1972; Кондратьев и др., 1982; Симонов, Симонова, 2014; Кондратьев, 2004]. Отметим некоторые из них:

- активность водных потоков и эрозионных врезаний реки, связанная с характеристиками повторяющихся паводков, на годовых и более высокого порядка интервалах времени;
- активность твердого стока реки, зависящая от геологического строения, свойств горного материала, активности водных потоков;
- турбулентные характеристики водного потока, определяющие интенсивность склоновой, глубинной и боковой эрозии;
- тектонические поднятия водоразделов и опускание базиса эрозии, живая сила потока, коррозия, шероховатость русла, его уклон, гидравлический радиус;
- климатические факторы от атмосферных до растительного покрова.

Интенсивность геологической деятельности водного потока, а значит и характер распределения металлоносного слоя донных наносов зависят и от быстроменяющихся показателей и характеристик. Например, от таких, как структура перекатов и плесов, их частота и протяженность, наклон различных



**Рис. 1. Фрагмент дна речной долины.**

*a* — россыпь в аллювиальных отложениях, *б* — россыпь без вмещающих пород. 1 — аллювий, 2 — россыпь.  $\beta$  — угол наклона дна долины.

участков русла, скорость движения воды, интенсивность переноса и скорость переотложения донных наносов, сила паводков. Частица, находящаяся на дне, теряет устойчивость при некоторой начальной донной скорости трогания. Последняя зависит от плотности и крупности частиц наносов, силы лобового давления, подъемной силы, вязкости воды,

силы трения. Не менее сложным образом происходит процесс осаждения взвешенных наносов. Для расчета максимального расхода талых вод в горных реках используют параметр дружности половодья, определяемый по данным рек-аналогов, расчетный слой суммарного весеннего стока заданной обеспеченности, коэффициенты вариации и асимметрии, определяемые по длительным рядам наблюдений, коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов, и многие другие.

Основной объем информации, получаемый при изучении русловых процессов, носит стохастический характер, а в выявленных закономерностях активно используются эмпирические коэффициенты. В условиях существенной сложности учета большого количества подобных параметров предлагается по иному подойти к построению модели перемещения частиц золота и иного обломочного материала в общем русловом потоке.

Типичные россыпи золота характеризуются протяженностями от сотен метров до десятков километров, шириной от первых десятков до сотен метров, мощностью продуктивного пласта от десятков сантиметров до нескольких метров [Методические рекомендации..., 2007]. Рассмотренная в работе россыпь имела протяженность около  $10^3$  м. Протяженность участка долины р. Геналдон, на котором произошел перенос ледово-водно-каменной массы, превосходил ширину потока в десятки раз. Такие параметры рассматриваемых объектов дали возможность использовать одномерное представление процессов переноса.

Одним из компонентов, участвующих в сложном процессе перемещения по дну речной долины вещества в разных формах: водного потока, влекомых и взвешенных наносов, является полезный минерал россыпи. Допустим следующее. Пусть частицы россыпи перемещаются как самостоятельный поток. Предположим, что все особенности его движения функционально связаны через ряд коэффициентов с движением вмещающей среды. Так, коэффициент вязкости будет отвечать за подвижность частиц, т.е. содержать в себе силы, тормозящие их движению. Массовая сила, сталкивающая частицы вниз по наклонной поверхности, будет включать в себя гидродинамические свойства русла и руслового потока. Диффузия будет характеризовать динамику рассредоточения вещества россыпи вследствие наличия неравномерного его распределения. Совокупность движущихся по дну долины частиц только полезного минерала назовем твердым потоком (рис. 1). Его перемещение можно сравнить с медленным стеканием по наклонной плоскости, например, вязкого лавового потока. Такая характеристика твердого потока, как плотность, будет представлять собой массу только полезного минерала, содержащуюся в единице объема. Далее эту плотность назовем условной плотностью твердого потока (в отличие от обычной плотности, характеризующей содержание всего вещества в единице объема). Это удобно сделать в силу того, что все компоненты влекомых наносов (полезный минерал, песок, галечник) перемещаются с существенно разными скоростями как относительно независимые потоки вещества. Из общего потока мы выделим только один компонент — полезный минерал. В случае ледового селя под условной плотностью твердого потока будем понимать массу всего вещества без разделения на компоненты (лед, воду, обломки горных пород), содержащуюся в единице объема. Активная турбулентность в селевом потоке делает распределение вещества в среднем однородным.

В целом такой подход позволил упростить расчетную схему, так как в описание процессов перемещения твердого потока вошло ограниченное количество параметров. Аналогичным образом в аналитических представлениях процессов тепломассопереноса эмпирическими законами Фурье, Фика, Дарси используются коэффициенты, агрегирующие в себе многочисленные свойства взаимодействующих сред.

В соответствии с отмеченными свойствами твердого потока было допущено, что его движение по дну речной долины происходит подобно одномерному неустановившемуся течению по на-

клонной поверхности тонкого слоя вязкой жидкости. Для его описания использовалась система уравнений Навье—Стокса [Лыков, 1978; Флетчер, 1991; Гёбхарт и др., 1991], состоящая из уравнений для импульса и плотности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + F, \quad (1)$$

$$F = w g \rho \sin \beta,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + S + G. \quad (2)$$

Здесь  $u = u(x, t)$  — скорость;  $\rho = \rho(x, t)$  — плотность твердого потока;  $\mu = \mu(x, t)$  — коэффициент динамической вязкости потока, в общем случае переменный вдоль пути движения;  $F$  — массовая сила;  $w$  — коэффициент коррекции действия массовой силы;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\beta = \beta(x, t)$  — угол наклона к линии горизонта поверхности движения потока;  $D$  — коэффициент диффузии плотности вещества потока;  $S = S(x, t)$ ,  $G = G(x, t)$  — распределенные вдоль пути перемещения потока источники и стоки соответственно;  $x, t$  — координаты по пространству и времени,  $0 \leq x \leq L$ ,  $t \geq 0$ ;  $L$  — длина пути твердого потока. Параметры  $u$  и  $\rho$  взаимно зависимы, так как входят одновременно в оба уравнения.

Подобный математический подход использован, например, для описания процессов эрозии и склоновых ручьях [Ларионов и др., 2008].

Уравнение для плотности (2) записано в форме, учитывающей возможную диффузию вещества и наличие источников-стоков. Для твердого потока под параметром  $\rho$  понималась плотность россыпи. В соответствии со сделанным выше допущением только вещество россыпи заполняет единицу объема, поэтому плотность россыпи  $\rho$  названа условной. Для активного влияния в ходе численных экспериментов на процесс переноса вещества был введен коэффициент условной диффузии  $D$  плотности  $\rho$ .

В большинстве численных схем на результат моделирования оказывают серьезное влияние погрешности расчетов, в частности, численная диссипация [Оран, Борис, 1990; Флетчер, 1991; Гёбхарт и др., 1991]. Ее роль проявляется в диффузном сглаживании (уменьшении амплитуды и расширении крыльев) распространяющейся волны, например, концентрации. С другой стороны, в рассматриваемых природных процессах происходит сглаживание волны распределения золота или вещества селя за счет естественной диффузии неравномерно распределенного движущегося вещества. В численных экспериментах были установлены такие значения диффузии, которые вместе с иными параметрами приблизительно обеспечивали натурное распределение  $\rho$ . Так как величина диффузии содержит и природную, и численную компоненты, ее назвали условной диффузией.

Уравнения замыкались граничными и начальными условиями:

на левой границе (входе):  $u(0, t) = C_1$ ;  $\rho(0, t) = C_2$ ;  $C_1, C_2$  — в общем случае функции, зависящие от времени; на правой границе задавалось условие сноса параметра по течению:  $\partial u / \partial x|_L = 0$ ;  $\partial \rho / \partial x|_L = 0$ ; в начальный момент времени  $u(x, 0) = 0$ ;  $\rho(x, 0) = 0$ .

Для учета особенностей движения твердого потока, связанных со скачкообразным характером перемещения россыпи по дну долины и с начальным разгоном ледово-каменного потока, полученного им на этапе обвала ледовой массы с горных склонов, был введен коэффициент  $w$ , с помощью которого можно было управлять величиной массовой силы.

Задача сводилась к нахождению таких полей скорости и плотности, при которых обеспечивалось бы условие:

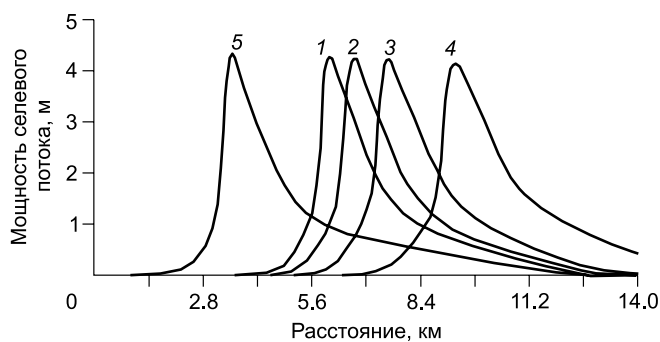
$$|A_p - A_n| / A_n \leq \varepsilon, \quad (3)$$

где  $A_p, A_n$  — рассчитанные и натурные значения этих параметров соответственно,  $\varepsilon$  — заданная погрешность.

Задачи (1), (2) с приведенными краевыми условиями решались методом конечных разностей с применением безусловно устойчивой неявной схемы против потока, обладающей вторым порядком аппроксимации по времени и пространству [Самарский, 1977; Оран, Борис, 1990].

Для выявления чувствительности расчетной схемы к вариациям входных параметров была выполнена серия численных экспериментов, где они изменялись в широких интервалах. При выборе границ этих интервалов использовались данные из различных источников [Сорохтин, Ушаков, 2002; Кочерян, 2009].

В качестве примера рассмотрим влияние некоторых параметров на интенсивность процесса быстрого перемещения горного материала по дну долины. На рис. 2 приведено положение волн твердого потока на один и тот же момент времени (520 с), когда варьировалась его вязкость и наклон к линии



**Рис. 2. Положение волны твердого потока в зависимости от свойств среды распространения.**

1—4 — вязкость  $\mu = 800$  Па·с, наклон дна 5, 8, 12, 20° соответственно; 5 —  $\mu = 2000$  Па·с, наклон 5°.

горизонта поверхности стока. Уклон дна учитывался в массовой силе и существенно влиял на скорость движения волны (см. рис. 2, кривые 1—4). С ростом угла наклона скорость увеличилась и несколько уменьшалась высота волны за счет уширения ее основания. Увеличение вязкости (фактически трения) твердого потока замедляло скорость его движения по наклонной плоскости (см. рис. 2, кривые 1, 5).

Для проведения численных экспериментов и верификации расчетной схемы были подобраны природные объекты, содержащие в своих описаниях достаточное количество исходных данных.

### ДИНАМИКА РОССЫПИ

Активное эндогенное рудообразование на Северо-Востоке России приходится на конец юры — мела [Шило, 2000; Гольдфарб, 2009]. Дайковые, кварцево-жильные, прожилковые, штокверковые месторождения служили основными коренными источниками богатых россыпных месторождений. Наиболее богатыми являются аллювиальные месторождения плейстоцен — голоценового возраста.

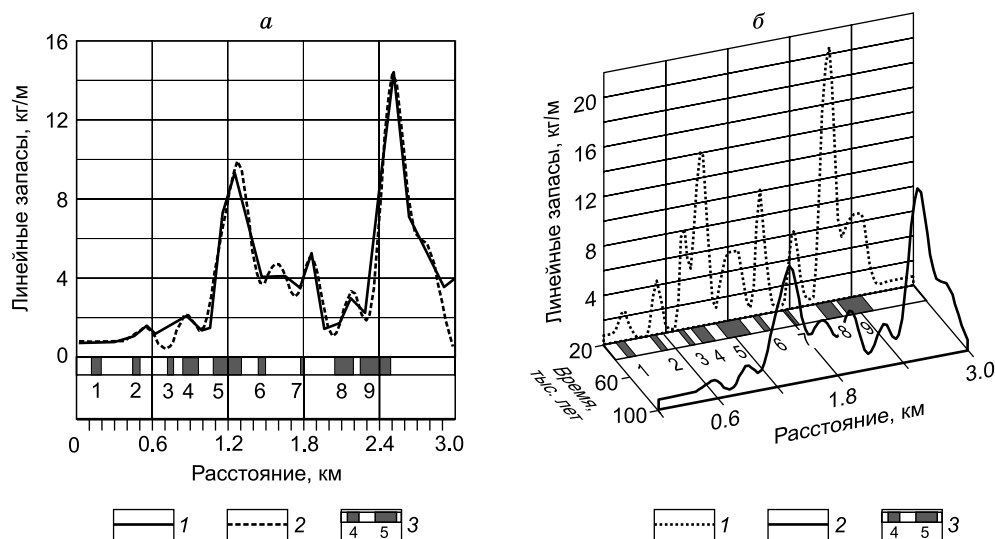
Россыпное месторождение руч. Павлик находится в центральной части Магаданской области. Ручей Павлик является правым притоком р. Омчак. Месторождение принадлежит Омчакскому рудно-россыпному узлу, расположенному на Охотско-Колымском нагорье [Гончаров и др., 2002; Литвиненко, 2002]. Это долинная россыпь протяженностью около 2.3 км в своей верхней части переходит в россыпь руч. Крутой протяженностью около 0.8 км. Днище долин обоих ручьев выполнено мощной толщей аллювиальных отложений: в каньонной части долины до 30 м, в верховьях древней поймы 2—9 м, в низовьях 3—5 м. Возраст отложений поймы относят к среднему плейстоцену. Отложения включают галечник, песчаный суглинок, щебень, глину. Ниже залегают трещиноватые глинистые и песчано-глинистые сланцы. Мощность песков в верхней части месторождения достигала 1.0—2.7 м, в нижней 1.9—3.5 м. Максимальное содержание золота на отдельных участках россыпи доходило до  $0.204$  кг/м<sup>3</sup>, изменяясь для разных россыпных струй в интервале 0.001—0.018 кг/м<sup>3</sup>.

Для россыпи месторождения руч. Павлик с помощью моделирования определяли возможности получения распределения линейных запасов золота, близких реальным. В численных экспериментах изучали взаимодействие восьми россыпных струй, имитирующих вскрытие и разрушение восьми разнесенных коренных источников (в соответствии с предположением — сколько пиков в распределении золота по долине, столько и источников [Булгаков, 1984]). Результирующее распределение определяли как суперпозицию этих перемещающихся вниз по долине россыпных струй.

Сложность получения в расчетах требуемого натурального распределения россыпи состояла в том, что установленное распределение — продукт тысячелетних процессов в речной долине. Свое влияние здесь могли оказывать эрозионные циклы, изменение климата, свойства горных пород, распределение этих свойств по долине и многое другое. Модели строились в предположении постепенного изменения свойств изучаемой среды, хотя не исключалась возможность их резкого изменения.

При проведении расчетов изменялись не только значения управляющих параметров (коэффициентов уравнений), но и геометрические характеристики — протяженность источников, их взаимное расположение. Результаты моделирования динамики россыпи представлены на рис. 3. На нем сопоставлены распределения линейных запасов полезного минерала, полученные в результате расчетов и установленные для россыпи в ходе отработки месторождения [Литвиненко, 2002]. На рис. 3, б приведено распределение полезного минерала вдоль речной долины на моменты времени 20 и 100 тыс. лет. В расчетах для условной плотности  $\rho(x, t)$ , которая принималась эквивалентной линейному запасу, использовалась единица кг/м. Просчетом различных вариантов удалось добиться удовлетворительной близости этих распределений.

На месторождении Павлик установленное в ходе горных работ распределение россыпи представляло собой наложение потоков минерала от разных источников. С течением времени при смещении струй россыпи вниз по долине происходило постепенное сглаживание пиков, наползание их крыльев



**Рис. 3. Распределение линейных запасов золота в россыпи месторождения Павлик.**

*a* — сопоставление натуральных данных (1 [Литвиненко, 2002]) и результатов численного моделирования (2); *б* — распределение золота вдоль речной долины на моменты времени 20 (1) и 100 (2) тыс. лет; *а, б* — 3 — распределение коренных источников золота вдоль долины в соответствии с их протяженностью.

друг на друга (см. рис. 3, *б*). Самые высокие пики, по всей видимости, формировались несколькими источниками. Об этом говорит заметная их асимметрия.

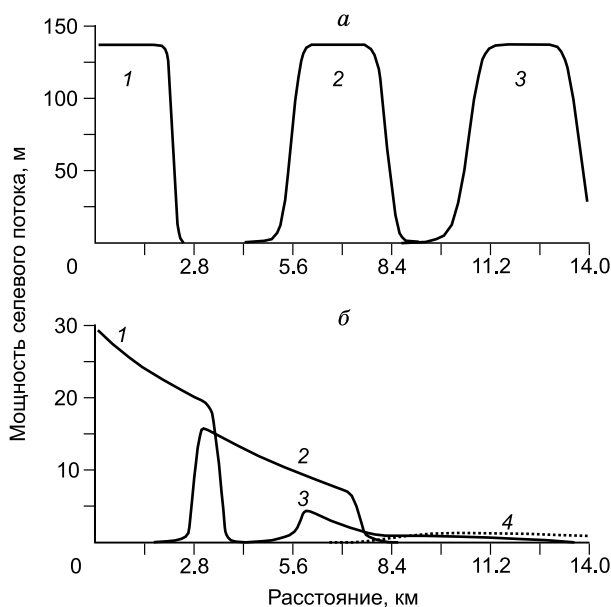
Форма суммарной кривой распределения россыпи говорит о том, что вся совокупность процессов речной долины в определенный момент времени прекратила оказывать влияние на перенос полезного минерала. С того момента россыпь была погребена аллювиальными отложениями.

В расчетах использовались следующие значения параметров:  $\mu = 3 \cdot 10^{14}$  Па·с,  $D = 7 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, источники  $S = 1.5 \cdot 10^{-12}$ — $2.5 \cdot 10^{-11}$  кг/м<sup>3</sup>·с, сток  $G = 3 \cdot 10^{-14}$  кг/м<sup>3</sup>·с,  $\beta = 3^\circ$ . Так, источник № 1 характеризовался протяженностью 90 м, интенсивностью поступления золота в россыпь  $4.7 \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>·с; источник № 7 — 25 м,  $1.4 \cdot 10^{-11}$  кг/м<sup>3</sup>·с, источник № 9 — 240 м,  $1.0 \cdot 10^{-11}$  кг/м<sup>3</sup>·с. Продолжительность поступления золота от источников (вскрытых рудных тел) происходила на интервале времени  $6.4 \cdot 10^{11}$  с (около 20 тыс. лет). Сток, задававший интенсивность потери минерала россыпью (в реальных условиях — выпадение его на плотик), действовал на всем расчетном интервале времени. Расчет прекращался в момент выполнения условия (3).

Численные эксперименты показали, что россыпь могла распределиться по дну долины представленным образом (см. рис. 3) за промежуток времени около 100 тыс. лет. В дальнейшем она была погребена речными наносами и находилась в таком состоянии, возможно, миллионы лет [Гольдфарб, 2009; Смирнов, 2012]. В расчетных вариантах допускался более длительный период формирования россыпи. Тогда кривая распределения активно деформировалась, становясь все более сглаженной, все больше отклоняясь от реального. Иное распределение источников вдоль дна долины, другие значения их интенсивности или протяженности приводили к отклонению численного распределения минерала от натурального, существенно растущему с течением времени. Таким образом, в условиях данной модели было подобрано единственно удовлетворительное распределение источников россыпного материала.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЛЕВОГО ПОТОКА

Ледовый сель, пронесшийся по долине р. Геналдон в 2002 г., характеризуется следующими значениями параметров. Участок транзита потока от ледника Колка до Кармадонского ущелья имел протяженность около  $14 \cdot 10^3$  м. Ширина потока составляла 400—500 м, высота волн достигала 100—150 м [Поповнин и др., 2003; Петраков и др., 2013]. Объем ледового тела, заполнившего долину р. Геналдон в Кармадонской котловине, оценен в 115 млн м<sup>3</sup>. Минимальные и максимально возможные скорости ледового потока могли достигать 37 и 80 м/с, время его движения со средней скоростью 60 м/с не превысило  $3 \cdot 10^2$  с. Ниже Кармадонского ущелья прошли остатки ледового потока в форме водно-каменного селя, объем которого оценивается в 3—5 млн м<sup>3</sup>. Высота волны на выходе из ущелья могла составлять 30 м, скорости движения — соответствовать скоростям обычных селевых потоков.



**Рис. 4.** Положение волны ледово-водно-каменного потока в верхней части долины р. Геналдон (а) на моменты времени (с): 1 — 50, 2 — 170, 3 — 260 и грязекаменного селевого потока в нижней части долины (б) на моменты времени (с): 1 — 166, 2 — 350, 3 — 520, 4 — 690.

В качестве исходных данных для модели селевого потока использовались следующие значения параметров. Для верхнего участка долины от ледника Колка до Кармадонского ущелья:  $\mu = 8 \cdot 10^2$  Па·с,  $D = 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, распределенные вдоль долины источники и стоки отсутствовали,  $\beta = 14.5^\circ$ ,  $w = 0.040$ , начальная скорость 40 м/с. В течение первых 50 с на входе держалось значение условной плотности  $\rho(0, t) = 2.05 \cdot 10^5$  кг/м<sup>3</sup> (играло роль источника на входе). В рассматриваемой одномерной модели под условной плотностью понимали высоту столба ледово-водно-каменной массы, приходящуюся на 1 м<sup>2</sup>

площади потока. Плотность селевого потока принималась равной 1500 кг/м<sup>3</sup> [Талапов, 2007; Петров, 2012]. Тогда в соответствии с заданным  $\rho(0, t)$  начальная высота волны ледового селя могла составлять 137 м. Эти начально-краевые условия обеспечивали поступление в расчетную область объема селевого потока в 115 млн м<sup>3</sup> при ширине потока 420 м, что совпадает с натурной оценкой [Поповнин и др., 2003; Петраков и др., 2013]. Таким образом, в модели основные характеристики ледового селя соответствовали реальным.

Для нижнего участка долины от ущелья до с. Гизель протяженностью 17 км:  $\mu = 8 \cdot 10^2$  Па·с,  $D = 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с, распределенные вдоль долины источники отсутствовали, сток  $G = 10^2$  кг/м<sup>3</sup>с,  $\beta = 5^\circ$ ,  $w = 0.011$ , начальная скорость 20 м/с. В течение первых 166 с на входе держалось значение условной плотности  $\rho(0, t) = 4.38 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>, что соответствовало высоте волны на входе около 30 м. Согласно этим условиям, в расчетную область поступило около 4 млн м<sup>3</sup> водно-каменной массы. Это значение попадало в интервал оценки 3—5 млн м<sup>3</sup>, приводимой в источниках [Поповнин и др., 2003]. Сток работал на всем расчетном интервале времени, представляя собой интенсивность удаления из потока части грязекаменного материала.

Результаты расчета движения волны ледового селя в долине р. Геналдон представлены на рис. 4. На нем показано распределение ледово-водно-каменной массы в потоке на различные моменты времени для верхнего и нижнего участков долины. Волна 1 (см. рис. 4, а) формировалась в течение первых 50 с, когда на левой границе действовал источник поступления ледового материала. При движении волны за счет диффузионных процессов происходило расширение основания волны и уменьшение ее высоты.

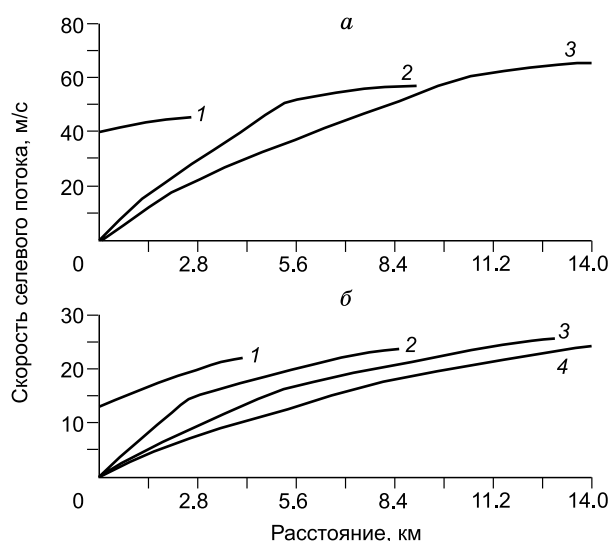
Ледово-водно-каменный поток прошел расстояние в 14 км до Кармадонского ущелья за 260 с. Конечное положение потока отображает волна 3 (см. рис. 4, а). Параметры модели обеспечили высоту волны селевого потока, прорвавшегося ниже ущелья, около 32 м (см. рис. 4, а, это соответствует правому краю волны 3), что практически совпало с опубликованными оценками [Поповнин и др., 2003]. В верхней части долины потери вещества потоком были незначительны. Об этом можно судить по фотографиям состояния дна долины [Поповнин и др., 2003]. Об этом же свидетельствует вид кривых на рис. 4, а — высота волны изменялась незначительно. На нижнем участке характер потока существенно изменился: двигаясь с меньшей скоростью, ослабевший поток терял основную массу своего вещества. Из рис. 4, б видно, что на участке своего движения протяженностью до 10 км высота волны уменьшилась с 30 до 1 м. Далее сел проходил в форме наносоводного паводка [Поповнин и др., 2003]. Из расчетов следует, что селевой поток прошел 17 км своего пути между Кармадонским ущельем и с. Гизель за 690 с.

На рис. 5 показаны скорости движения селевого потока в разных частях долины. В начальный момент на левой границе верхнего участка долины задавалась скорость 40 м/с. За 50 с действия источника на входе она выросла до 45 м/с. При подходе потока к ущелью его скорость изменялась от 60 до 65 м/с. На нижнем участке долины скорость волны за первые 166 с изменилась от 13 до 22 м/с. Далее ее максимальные значения изменялись от 22 до 26 м/с. Полученные в расчетах скорости волны совпали с оценками, которые даются в работах [Божинский и др., 2002; Поповнин и др., 2003] для верхнего участка долины. Для нижнего участка они близки к принятым средним значениям скоростей селевых пото-

**Рис. 5. Распределение скорости в ледово-водно-каменном потоке (а) на моменты времени (с): 1 — 50, 2 — 170, 3 — 260 и грязекаменном селевом потоке (б) на моменты времени (с): 1 — 166, 2 — 350, 3 — 520, 4 — 690.**

ков [Талапов, 2007; Петров, 2012]. Правый конец каждой кривой распределения скорости (см. рис. 5) соответствует правому краю волны (см. рис. 4). Для удобства анализа графиков протяженность верхнего и нижнего участков долины на рисунках приводится одинаковой величины — 14 км.

При проведении расчетов в качестве критерия точности использовалось соотношение (3). Сравнивались значения мощности ледово-каменных отложений для нескольких точек траектории движения селевого потока, полученные в численных экспериментах и в гляциологических экспедициях методами бурения [Поповнин и др., 2003; Мавлюдов, 2011]. Вычисленная мощность остановившегося ледового тела для четырех таких точек составила 130, 135, 60, меньше 1 м (см. рис. 4, а, этим точкам соответствует положение волны 3). Точки находились на расстоянии 0,8, 2,5, 3,5, 5,5 км от конца расчетной области соответственно (т.е. от ущелья). Разница между вычисленными значениями мощности в этих точках и замеренными в скважинах составила менее 10 %. Масса вносимого селевым потоком вещества и распределение его вдоль пути движения на нижнем участке долины с учетом отложения также близки к натурным оценкам.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Транспорт россыпи по дну долины — типичный процесс переноса вещества под действием сил гравитации и водного потока. Водный поток и влекаемые наносы могут двигаться со скоростями, например, 1—5 м/с, передавая часть своей энергии частицам золота. Частицы золота, перемещаясь скачками, надолго задерживаются на своих местах. Весь поток россыпи перемещается со средней скоростью  $\sim 10^{-8}$  м/с. Таким образом, при изучении динамики россыпи требуется совмещать два существенно разнородных по физическим параметрам процесса — быстрый по геологическим меркам перенос донных наносов и медленный перенос полезного минерала. Если расчетную схему строить на основе адаптации быстрых процессов к медленным, то потребовалось бы знание множества осредненных на тысячелетних интервалах времени гидрологических параметров. Такого характера информация в настоящее время отсутствует. Это послужило причиной подойти к моделированию перемещения россыпи с иных позиций. Очень медленное движение россыпи было представлено в форме течения сильновязкого твердого потока. При этом допускалось, что в таком медленном течении в вязкости содержатся не только свойства внутреннего трения, но и свойства самого водного потока — движителя, содержащего влекаемые наносы. Поскольку свойства водного потока определяются его взаимодействием с внешней средой, то считалось, что все типы этого взаимодействия передаются и свойствам твердого потока. Здесь и изменение по разным причинам геологического строения русла, его шероховатость, сила потока в разные периоды развития долины и т.д. Диффузия как один из параметров твердого потока определяла интенсивность процесса рассредоточения вещества в окружающей его среде в силу его градиентного распределения. С другой стороны, с помощью этого коэффициента можно было управлять процессом течения твердого потока в математической модели.

Селевой поток так же был рассмотрен, как и вязкий твердый поток. В ходе численных экспериментов использованные значения параметров селевого потока обеспечили не только близкие к реальным значения мощности остановленного ущельем ледового тела, но и высоту волны грязекаменного потока, движущегося далее Кармадонского ущелья к месту слияния Геналдона с рекой Гизельдон и до с. Гизель.

Вязкие свойства твердого потока, имитирующего россыпь, подбирались в ходе численных экспериментов. По порядку величин они попали в интервал между свойствами асфальтов и льда [Шкадов, 1967; Химическая энциклопедия..., 1988]. Для селевого потока в расчетах использовались близкие к натурным значения параметров, установленные на основе изучения последствий прохождения селей по речным долинам.

В численных экспериментах были получены распределения мощности остановившейся ледово-водно-каменной массы селевого потока и полезного минерала в россыпи, близкие к натурным данным.



Это считалось главным критерием оценки результатов моделирования. Выполненные исследования показали принципиальную возможность моделировать движение геологических тел, представляя их в форме твердого потока со свойствами вязкой жидкости.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Билибин Ю.А.** Основы геологии россыпей. М., Изд-во АН СССР, 1955, 472 с.
- Божинский А.Н., Назаров А.Н., Сапунов В.Н.** Статистическое моделирование динамики водоснежных потоков // Вестн. МГУ. Сер. 5, География, 2002, № 5, с. 39—43.
- Булгаков В.С.** О теоретической модели образования аллювиальных россыпей золота // Проблемы континентального россыпеобразования. Материалы VI Всесоюзного совещания по геологии россыпей. Владивосток, Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1984, с. 18—24.
- Виноградова О.В., Хмелева Н.В.** Русловые процессы и формирование аллювиальных россыпей золота. М., Изд-во Моск. ун-та, 2009, 171 с.
- Геххарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б.** Свободно-конвективные течения, тепло- и массообмен. Т. 1. М., Мир, 1991, 678 с.
- Гольдфарб Ю.И.** Динамика формирования, классификация и возраст аллювиальных россыпей золота северо-востока Азии: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Магадан, СВК НИИ ДВО РАН, 2009, 47 с.
- Гончаров В.И., Ворошин С.В., Сидоров В.А.** Наталкинское золоторудное месторождение. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2002, 250 с.
- Золото-2011.** Ежегодный доклад Союза золотопромышленников // Золото и технологии. М., 2012, № 2(16)/июнь, 2012, <http://zolteh.ru/index.php?dn=news&to=art&id=436>.
- Карташов И.П.** Основные закономерности геологической деятельности рек горных стран (на примере Северо-Востока СССР). М., Наука, 1972, 212 с.
- Кондратьев А.Н.** Относительная транспортирующая способность и другие руслоформирующие факторы, 2004, 325 с., <http://bedload.boom.ru/Channel/Thesis2004/CH7.HTM>.
- Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снисенко Б.Ф.** Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л., Гидрометеиздат, 1982, 272 с.
- Корчуганова Н.И.** Геология россыпей. Методические рекомендации. М., Изд-во ГЕОКАРТ-ГЕОС, 2010, 306 с.
- Кочерян Г.Г.** Деформационные процессы в массивах горных пород. Учебное пособие. М., Изд-во МФТИ, 2009, 378 с.
- Ларионов Г.А., Гендугов В.М., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф.** Механизмы боковой эрозии в склоновых ручьях // Почвоведение, 2008, № 3, с. 330—337.
- Литвиненко И.С.** Россыпные месторождения золота Омчакского узла. Магадан, Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 2002, 92 с.
- Лыков А.В.** Теплообмен. Справочник. М., Изд-во Энергия, 1978, 480 с.
- Мавлюдов Б.Р.** Разрушение Геналдонского ледяного завала (Северная Осетия) в 2002—2006 годах // Криосфера Земли, 2011, т. 15, № 1, с. 68—79.
- Маккавеев Н.И., Чалов Р.С.** Русловые процессы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1986, 263 с.
- Методические рекомендации по применению «Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Россыпные месторождения».** М., Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р. М., 2007, 2012, <http://ugra-nedra.ru/wp-content/uploads/2011/04/rossypi.doc>.
- Митькин В.И.** Отчет руководителя департамента природных ресурсов Магаданской области, 2014, <http://www.interfax-russia.ru/FarEast/exclusives.asp?id=445741>.
- Оран Э., Борис Дж.** Численное моделирование реагирующих потоков. М., Мир, 1990, 660 с.
- Петраков Д.А., Дробышев В.Н., Алейников А.А., Аристов К.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** Изменения в зоне Геналдонской гляциальной катастрофы в период 2002—2010 гг. // Криосфера Земли, 2013, т. 17, № 1, с. 35—46.
- Петров В.Ф.** Селеведение. М., Изд-во Моск. ун-та, 2012, 271 с.
- Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.** Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли, 2003, т. 7, № 1, с. 3—17.
- Самарский А.А.** Теория разностных схем. М., Наука, 1977, 654 с.
- Самусиков В.П.** Особенности пространственного распределения золота в некоторых россыпях бассейна реки Большая Куобах-Бага // Россыпи, источники, их генезис и перспективы. Материалы конференции, посвященной 90-летию со дня рождения И.С. Рожкова и Ю.Н. Трушкова. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2000, с. 134—143.

**Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю.** Речные бассейны: их место и функции в системе процессов биосферы // Эколого-географические исследования в речных бассейнах. (Материалы Четвертой Всероссийской научно-практической конференции). Воронеж, Воронежский пед. университет, 2014, с. 21—31.

**Смирнов В.Н.** Верхоянско-Чукотская область новейшего горообразования: зональность и основные этапы формирования // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (5), с. 610—620.

**Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.** Развитие Земли. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 570 с.

**Такабаев М.К.** Численное моделирование селевого потока: Автореф. дис. ... д.ф.-м.н. Алматы, КазНГУ, 1996, 36 с.

**Талапов Е.А.** Геоэкологическое обоснование шкалы поражающей способности водной эрозии и селеобразования // Вест. КазНТУ, 2007, № 5 (62), с. 9—15.

**Трофимов В.С.** Геология россыпей. М., Наука, 1965, 86 с.

**Трофимов В.С.** Основы геологии россыпей. М., Наука, 1980, 472 с.

**Трушков Ю.Н.** Определение местоположения коренного источника и опыт его реконструкции // Поиски и опыт реконструкции коренных источников золота по разведанным россыпям. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1975, с. 50—63.

**Флетчер К.** Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1. М., Мир, 1991, 504 с.

**Филиппов В.Е.** Моделирование процессов формирования россыпей золота: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Якутск, ИГДС СО РАН, 1999, 52 с.

**Чалов Р.С., Голосов В.Н., Сидорчук А.Ю.** Учение Н.И. Маккавеева о едином эрозионно-аккумулятивном процессе и теория эрозионно-руслowych систем // Геоморфология, 2008, № 3, с. 6—14.

**Химическая энциклопедия.** В 5 т. Т. 1 / Ред. И.Л. Кнунянц. М., Изд-во «Сов. энцикл.», 1988, 623 с.

**Черноморец С.С., Михайлов В.О.** Численное моделирование катастрофических селей, обвалов и оползней с применением трехмерной дискретной модели // Геориск, 2012, № 1, с. 16—27.

**Шкадов В.Я.** Волновые режимы течения тонкого слоя вязкой жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа, 1967, № 1, с. 43—51.

**Шило Н.А.** Основы учения о россыпях. М., Наука, 1981, 383 с.

**Эглит М.Э.** Неустановившееся движение в руслах и на склонах. М., Изд-во Моск. ун-та, 1986, 94 с.

**Эрозия почв и русловые процессы** / Ред. Р.С. Чалов. Вып. 13. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, 274 с.

**Яхияев Ф.К.** Математическое моделирование движения оползня-потока // Вест. Национальной инженерной академии Республики Казахстан, 2008, № 1(27), с. 45—49.

*Рекомендована к печати 29 июня 2015 г.  
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию  
24 июня 2014 г.*