

УДК 551.332.56+556.5.072+556.556.2

## ПЕРВАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЙ В МЕЖГОРНОЙ КОТЛОВИНЕ ПРИ СБРОСЕ ЛЕДНИКОВО-ПОДПРУДНОГО ОЗЕРА (НА ПРИМЕРЕ КУРАЙСКОЙ КОТЛОВИНЫ, ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

© 2015 г. Н. Г. Инишев, А. Н. Рудой, В. А. Земцов, Д. А. Вершинин

Представлено академиком РАН В.М. Котляковым 19.12.2013 г.

Поступило 27.11.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565215080216

Многие межгорные котловины Алтая в ледниковые эпохи плейстоцена были заняты ледниково-подпрудными озерами. Заполнения и последующие опорожнения котловинных озер происходили систематически, а сбросы озерных вод, по-видимому, носили катастрофический характер [1]. Крупнейшие котловинные озера (Чуйское, Курайское и др.) имели объем в сотни кубических километров, а расходы суперпаводков (дилювиальных потоков) могли достигать миллионов кубических метров в секунду. Эти потоки датируют по созданным ими геологическим телам 23–12 тыс. лет назад.

Первые палеогидрологические сценарии озерно-ледниковой истории позднечетвертичных перигляциальных равнин Северной Америки и гор Южной Сибири основывали на дедуктивном решении обратных гляциогидрологических задач по оставшимся после прорывов плейстоценовых ледниково-подпрудных озер формам рельефа и рыхлых отложений. Эти качественные модели принципиально не отличались, хотя численные характеристики объемов воды в озерах, скоростей и глубин потоков могли претендовать лишь на приближение к оценке порядка перечисленных параметров. Поэтому первые оценки гидравлических параметров дилювиальных потоков и объема озер Алтая были, возможно, преувеличены.

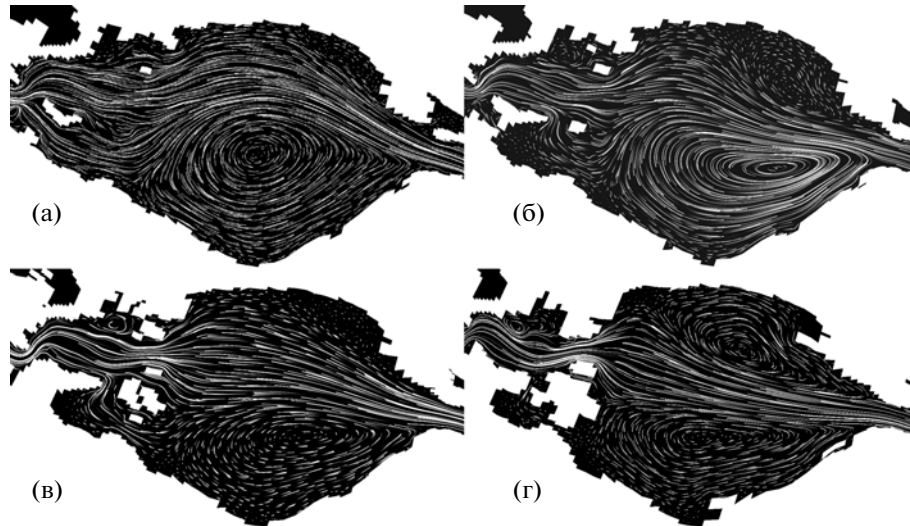
Около 20 лет назад появились компьютерные модели суперпаводков, возникавших при прорывах ледниково-подпрудных озер из Чуйской и Курайской межгорных котловин и распространявшихся вниз по долине р. Чуя до ее слияния с р. Катунь и далее вниз по уклону в предгорья Алтая [2–4].

Мы предлагаем первую двумерную компьютерную модель движения воды, включая цирку-

ляционные течения непосредственно в Курайской котловине в процессе опорожнения озер Чуйское и Курайское при разных расходах воды в транзитном потоке, движущемся вниз по Курайской котловине. Для создания модели использована программа RMA2 в моделирующей системе SMS 9.2 [5].

При моделировании принято допущение, что расходы воды на входе в озеро и выходе из него одинаковы. Это с определенной степенью приближения соответствует условиям транзитного, осложняемого внутриводоемной циркулирующей режима движения воды в оз. Курайское. Подобные условия, например, могли сложиться при почти одновременном прорыве верхней плотины между Курайским и Чуйским озерами и нижней ледниковой плотины на выходе из всей озерной системы.

Исходные материалы представлены цифровой моделью рельефа, полученной по данным космического зондирования земной поверхности (SRTM-матрицы) с разрешением 93 м с севера на юг и 60 м с запада на восток (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Таким образом, моделирование выполнено для условий современного рельефа. Поэтому следует иметь в виду, что полученные решения должны рассматриваться как достаточно приближенные, будучи отнесенными ко времени позднего плейстоцена. Расходы воды на входе в оз. Курайское принимали фиксированными — последовательно в диапазоне 10–0.3 млн м<sup>3</sup>/с с шагом до 1 млн м<sup>3</sup>/с. При этом уровни воды в нижнем створе (в районе современного пос. Чибит) задавали, исходя из необходимости получения устойчивых решений. Такой подход не сказывается на конечном результате расчета, так как уровни воды в указанном створе не влияют на условия ее движения непосредственно в озере вследствие наличия участков с бурным течением и гидравлическими прыжками сразу ниже места прорыва нижней плотины.



**Рис. 1.** Характер течений в оз. Курайское при транзитном расходе воды 9.6 (а), 5.5 (б), 4.5 (в), 2.8 млн м<sup>3</sup>/с (г). Транзитное течение направлено с востока на запад.

Уровни воды во входном сечении и в самом озере получаются в зависимости от заданного расхода воды и шероховатости дна. Коэффициент шероховатости *n* в формуле Маннинга принят для всего диапазона моделируемых условий равным 0.03. Коэффициент турбулентной вязкости задавали в зависимости от значения числа Пекле, определяемого критическими размерами ячеек расчетной сетки. Расчетная сетка составлена из 11590 элементов, или 35200 точек, в диапазоне высотных отметок 1072–2315 м.

Результаты расчета в двумерной модели дают последовательные мгновенные характерные планы течений в озере по мере изменения расхода транзитного потока (рис. 1). Результаты моделирования – поля глубин, отметок свободной поверхности и осредненных по вертикали скоростей течения (величина и направление вектора скорости). По ним легко определить также единичные расходы воды (т.е. расходы, относящиеся к единице ширины конкретного потока) на разных участках циркуляционных течений.

На рис. 1 видно, что по мере изменения расхода транзитного потока характер циркуляционных течений, определяемый, прежде всего, конфигурацией и рельефом самой котловины и русла потока между озерами Курайское и Чуйское, а также меняющимися уровнями воды в системе, испытывает определенного рода перестройку.

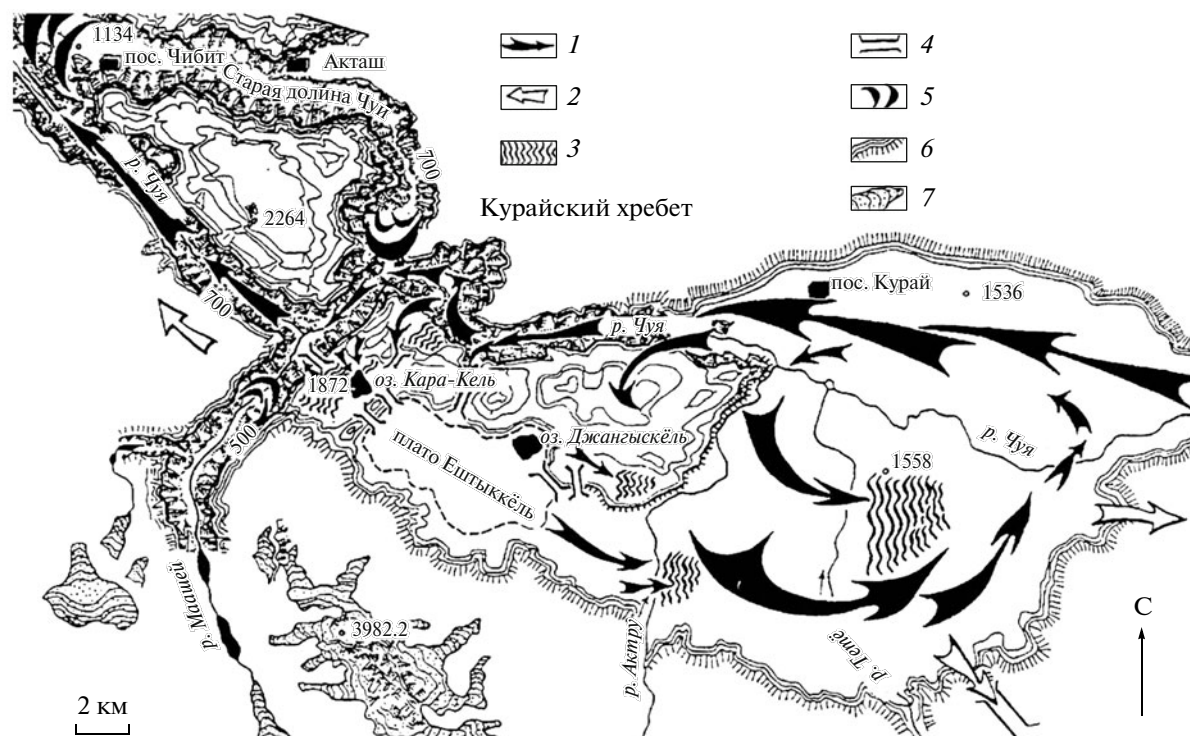
При наиболее высоких транзитных расходах воды 10–4.5 млн м<sup>3</sup>/с хорошо видны крупные циркуляционные вихри с течениями, направленными в центральной и южной частях Курайской котловины противоположно транзитному потоку, что может объяснить ориентацию расположенных здесь полей гравийных гряд (рис. 1а–в). Пл-

бина потока могла достигать в этих местах 400 м, а осредненные по вертикали скорости течения над существующими в настоящее время грядовыми полями – до 4–5 при скоростях в транзитной ветви потока 6–10 м/с. Рассчитанные по модели скорости циркуляционных потоков не противоречат значениям, вычисленным на основе теоретических представлений о движении гравийного материала на месте поля гряд на правом берегу р. Тетё в Курайской котловине [6]: 1.5–8 м/с при частных расходах воды собственно над полем 20–750 тыс. м<sup>3</sup>/с.

При более низких расходах воды могли образовываться уже два циркуляционных вихря с относительно слабыми течениями на юге и севере котловины с доминированием в ее центре транзитного потока (рис. 1г). Далее по мере уменьшения водности циркуляционные вихри исчезают.

Сопоставление схем циркуляции и значений гидравлических характеристик при разных транзитных расходах воды в озере с ориентацией гряд (гигантских дюн, антидюн) на дне Курайской котловины (рис. 2) позволяет с определенной долей приближения судить о том, в каких условиях и на каких этапах опорожнения озера могли бы образоваться те или иные поля гигантских знаков ряби (рис. 2).

Полученные результаты принципиально подтверждают ранее проведенные на геолого-геоморфологической основе палеогидрологические реконструкции [7]. В заключение подчеркнем, что реконструкция течений носит предварительный характер, что связано с использованием современной модели рельефа и достаточно грубых допущений относительно граничных и начальных условий при гидравлическом моделирова-



**Рис. 2.** Палеогидрологическая схема Курайской межгорной впадины на Алтае [7, 8]. Хронологический срез — около 11.5 тыс. лет назад. 1 — направление дилювиальных потоков; 2 — возможное направление дилювиальных потоков; 3 — поля гигантских знаков ряби течения; 4 — спиллвеи, ущелья прорыва и заплеска; 5 — конечные морены; 6 — границы впадины; 7 — современные ледники.

нии. Для выяснения возможности образования необходимых для грядового движения гравия скоростей течения, как и истинного генезиса полей ряби, требуются дальнейшие более детальные исследования.

Работа выполнена частично в рамках гранта по Постановлению Правительства Российской Федерации № 220 от 09 апреля 2010 г. по договору с Министерством образования и науки Российской Федерации № 14В25.31.0001 от 24 июня 2013 г. (БИО-ГЕО-CLIM) и грантов РФФИ 10-05-00625, 13-05-01086.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудой А.Н. // Изв. РГО. 1997. В. 1. С. 12–22.
2. Herget J. Reconstruction of Pleistocene Ice-Dammed Lake Outburst Floods in the Altai Mountains, Siberia // Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 2005. V. 386. 118 p.
3. Рудой А.Н., Земцов В.А. // Лед и снег. 2010. В. 1 (109). С. 111–118.
4. Carling P., Villanueva I., Herget J., Wright N., Borodavko P., Morvan H. Global and Planet. Change. 2010. V. 70. P. 24–34.
5. Surface Water Modeling System. Tutorials. Vers. 9.2. Provo (Utah): Brigham Young University; Environ. Modeling Res. Lab., 2006.
6. Carling P.A. // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 1996. V. 115. P. 165–179.
7. Рудой А.Н. Четвертичная гляциогидрология гор Центральной Азии. Автореф. дис. д-ра географ. наук. Томск, 1995. 35 с.
8. Rudoy A.N. // Quatern. Intern. 2002. V. 87. № 1. P. 119–140.