Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 4, с. 80–89 **http://www.izdatgeo.ru**
УДК 511.311.21.(234.9)

ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОРЫВООПАСНЫХ ОЗЕР НА ПАМИРЕ

В.Г. Коновалов

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия, vladgeo@gmail.com

Изложен метод определения с помощью дистанционной информации важных характеристик режима прорывоопасных высокогорных озер гляциального генезиса: площади, объема, максимального расхода прорывной волны. На основе морфометрических характеристик по 141 высокогорному озеру, дифференцированных на четыре группы в зависимости от размеров площади, получены эмпирические формулы для расчета объема озера как функции его площади и максимальной глубины. Определение максимального расхода прорывной волны для ряда озер, расположенных в бассейне реки Гунт и представляющих потенциальную угрозу городу Хорог и другим населенным пунктам, выполнено по формуле Коста.

Высокогорное гляциогенное озеро, характеристики прорыва, Памир, дистанционная оценка

REMOTE SENSING MONITORING OF THE OUTBURST HAZARDOUS LAKES IN PAMIR

V.G. Konovalov

Institute of Geography RAS, 119017, Moscow, Staromonetny per., 29, Russia, vladgeo@gmail.com

The paper describes the method of using of remote sensing data to determine the important characteristics of the potentially dangerous mountain lakes of glacial origin: area, volume and maximal discharge of the outburst wave. Empirical formulae for computation of lake's volume as a function of its area and maximal depth have been obtained on the basis of initial data for 141 lakes distributed onto four groups. Maximal discharges of outburst wave, according to the Costa formula, have been determined for a set of lakes located in the Gunt River basin. These lakes could be the source of mudflows or flash floods potentially dangerous for Horog city and other settlements.

High mountain glacial lake, parameters of outburst, Pamir, remote sensing estimation

ВВЕДЕНИЕ

Опыт работы исследователей в различных странах показывает, что подавляющее большинство высокогорных озер имеют характерные признаки и достаточно легко идентифицируются на цветных изображениях горных областей со спутников LANDSAT, TERRA, IRS и др. Весьма трудоемкий процесс поиска небольших по площади озер и оцифровки их контуров поддается автоматизации после несложной предварительной обработки спутниковых изображений, как показано в работе [*Батыров, Яковлев, 2004*]. В настоящее время в странах Азиатского материка с развитым современным оледенением (Китай, Индия, Непал, Бутан, Пакистан) в ряде речных бассейнов проведена сплошная каталогизация высокогорных озер и получены данные об их расположении, площади и длине [*Mool et al., 2001; Mool, Bajracharya, 2003; Horstmann, 2004; Inventory..., 2004; Mool et al., 2004; Inventory..., 2005*]. По данным [*Inventory..., 2005*], общее число высокогорных озер в основном гляциального генезиса в бассейнах рек Инда и Ганга составляет 3600, их площадь 593,8 км^2. В Швейцарии, США и Канаде многие годы выполняются исследования прорывоопасных гляциальных озер с целью совершенствования методов расчета их режима [*Costa, 1985; Sakai et al., 2000; Huggel et al., 2003, 2004; Lindsay, 2003; Huggel, 2004; McKillop, 2005*]. В России комплексные работы с применением современных методов получения и обработки данных о режиме ледниковых, моренных и моренно-ледниковых озер проводятся на Кавказе [*Зимницкий, 2004, 2005; Зимницкий, Николайчук, 2006; Черноморец и др., 2007а,б*]. Разнообразная информация о высокогорных озерах на территории Центральной Азии и Казахстана (в границах бывшего СССР) содержится в работах [*Виноградов, 1977, 1980; Никитин, 1977, 1986; Озера..., 1980; Тукеев, 2002; Батыров, Яковлев, 2004; Усубалиев, Ерохин, 2006*] и др. Для территории Памира установлено, что в общем числе селевых явлений доля гляциальных селей составляет 22 %, причем последствия их схода бывают наиболее разрушительными [*Тукеев, 2002*]. Аналогичная картина наблюдается и в горах Казахстана.

Характерной особенностью регрессивной фазы состояния современного горного оледенения Земли является наличие большого числа эфемерных ледниковых и моренно-ледниковых озер, служащих потенциальным источником гляциальных селей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Одна из задач изучения опасных природных явлений, связанных с режимом оледенения в бас-

© В.Г. Коновалов, 2009

Таблица 1. **Параметры прорывоопасных высокогорных озер гляциального генезиса**

Район/Бассейн	Озеро	L, м	W, м	H_{mean}, м	H_{max}, м	F, км^2	V, млн м^3	$C = L/H_{max}$	M	$P = L/W$	Z, м	Ref
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
р. Лев. Талгар	№ 18	30	15	4,5	5,0	0,00004	0,00014	6,0	0,90	2,0	–	1
р. Узун-Каргалы	№ 05	30	15	1,0	1,6	0,00004	0,00004	18,8	0,63	2,0	–	1
р. Лев. Талгар	№ 17	10	6	0,8	1,8	0,00006	0,00007	5,6	0,44	1,7	–	1
р. Узун-Каргалы	№ 07	12	5	0,7	1,0	0,00006	0,00004	12,0	0,70	2,4	–	1
р. Лев. Талгар	№ 04	25	15	0,4	0,6	0,00014	0,00004	41,7	0,67	1,7	–	1
р. Каскелен	№ 14	15	10	0,6	0,8	0,00015	0,00009	18,8	0,75	1,5	–	1
р. Лев. Талгар	№ 1	15	10	1,3	2,0	0,00015	0,00027	7,5	0,65	1,5	–	1
р. Лев. Талгар	№ 5	24	14	0,7	1,2	0,00035	0,0002	20,0	0,58	1,7	–	1
р. Тургень	№ 1	30	12	1,3	3,0	0,00036	0,00045	10,0	0,42	2,5	–	1
р. Тургень	№ 2	40	10	2,5	5,0	0,0004	0,001	8,0	0,50	4,0	–	1
р. Тургень	№ 6	40	10	2,5	5,5	0,0004	0,001	7,3	0,45	4,0	–	1
р. Узун-Каргалы	№ 6	20	20	2,2	4,0	0,0004	0,0009	5,0	0,55	1,0	–	1
р. Мал. Алматинка	№ 5 (провал)	59	33	5,1	8,6	0,0011	0,0051	6,9	0,59	1,8	–	1
р. Иссык	№ 6	59	23	2,1	4,4	0,0013	0,003	13,4	0,48	2,6	–	1
р. Ср. Талгар	№ 2	51	26	3,1	5,1	0,0013	0,004	10,0	0,61	2,0	–	1
р. Иссык	№ 5	54	20	2,4	7,0	0,0014	0,004	7,7	0,34	2,7	–	1
р. Иссык	№ 02.15	80	20	1,6	3,7	0,0016	0,0025	21,6	0,43	4,0	–	1
р. Иссык	№ 02.14	90	20	2,0	3,0	0,0018	0,0036	30,0	0,67	4,5	–	1
р. Мал. Алматинка	№ 3	57	38	2,0	4,8	0,0018	0,0036	11,9	0,42	1,5	–	1
р. Узун-Каргалы	№ 04	160	140	5,5	12,5	0,0018	0,01	12,8	0,44	1,1	–	1
р. Лев. Талгар	№ 1	86	23	1,8	7,5	0,002	0,004	11,5	0,24	3,7	–	1
р. Ср. Талгар	№ 1	70	31	2,0	5,5	0,0022	0,004	12,7	0,36	2,3	–	1
Кавказ	бок Микельчиран	103	45	0,7	1,4	0,0029	0,0015	73,6	–	2,3	3330	1
Джунгарский Алатау/р. Сарканд	Транзитное, О	86	38,4	–	4,0	0,0033	0,00441	21,5	–	2,2	–	2
Европейские Альпы	Айскейв (Ice Cave Lake)	–	–	2,9	–	0,0035	0,01	–	–	–	–	5
р. Ср. Талгар	№ 06	120	40	1,0	3,0	0,0048	0,005	40,0	0,33	3,0	–	1
р. Бол. Алматинка	№ 02	100	60	3,5	8,0	0,0049	0,017	12,5	0,44	1,7	–	1
Кавказ	Треугольное	100	88	1,6	2,5	0,0059	0,0062	40,0	–	1,1	3380	13
р. Лев. Талгар	№ 19	100	66	2,5	4,2	0,006	0,015	23,8	0,60	1,5	–	1
р. Арабель	Арабель-1	120	80	–	2,5	0,007	0,006	48,0	–	1,5	3830	4
р. Джаламыунды	б/н	120	60	12,0	30,0	0,007	0,084	4,0	0,40	2,0	–	1
р. Иссык	№ 16	160	50	5,8	39,0*	0,008	0,031	4,1	0,15	3,2	–	1
р. Кегерташ	Джангыкоргон	190	56	2,0	5,0	0,008	0,017	38,0	0,40	3,4	–	1
Джунгарский Алатау/р. Сарканд	Транзитное, П	171	49,1	–	5,5	0,0084	0,014	31,1	–	3,5	–	2

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
р. Джаламыш	б/н	180	38	2,4	6,2	0,009	0,022	29,0	0,39	4,7	–	1
Европейские Альпы	Грубен-5 (Gruben Lake 5)	–	–	5,0	–	0,01	0,05	–	–	–	–	5
Кавказ/р. Адылсу	Лапа	384	100	2,5	12,0	0,01	0,065	32,0	0,21	3,8	2486	7
р. Мал. Алматинка	№ 4	150	75	7,8	12,0	0,01	0,08	12,5	0,65	2,0	–	1
р. Чемолган	№ 4	157	63	5,1	11,8	0,01	0,051	13,3	0,43	2,5	–	1
р. Бол. Алматинка	№ 12	178	62	5,2	18,0	0,011	0,058	9,9	0,29	2,9	–	1
р. Лев. Талгар	№ 04.03	158	69	4,3	10,0	0,011	0,047	15,8	0,43	2,3	–	1
р. Тургень	№ 01.12	200	55	1,4	4,6	0,011	0,016	43,5	0,30	3,6	–	1
р. Тургень	№ 5	135	135	3,5	8,1	0,0113	0,039	16,7	0,43	1,0	–	1
р. Бол. Алматинка	№ 01	210	80	4,1	10,0	0,0136	0,056	21,0	0,41	2,6	–	1
р. Тургень	№ 01.03	182	79	4,4	9,5	0,014	0,044	19,2	0,46	2,3	–	1
р. Бол. Алматинка	№ 014	200	80	1,5	3,5	0,016	0,024	57,1	0,43	2,5	–	1
Европейские Альпы	Крусо-бэби (Crusoe-Baby Lake)	–	–	4,7	–	0,017	0,08	–	–	–	–	5
Джумгал-тоо/р. Каракатты	Джаркурумды	–	–	–	5,5	0,018	0,08	–	–	–	3480	4
Кавказ	Микельчиран	185	146	2,7	5,7	0,0188	0,0414	32,5	–	1,3	3420	13
Тянь-Шань/р. Пскем	Нижнее	–	–	–	5,7	0,0188	0,039	–	–	–	–	8
Кавказ	Среднее	216	85	1,6	2,4	0,0189	0,0208	90,0	–	2,5	3390	13
Кавказ	Азау	553	136	3,5	8,0	0,02	0,07	69,1	0,44	4,1	3264	7
Европейские Альпы	Грубен-3 (Gruben Lake 3)	–	–	7,1	–	0,021	0,15	–	–	–	–	5
Джунгарский Алатау/р. Сарканд	Кокколь, О	232	93,5	–	14,0	0,0217	0,149	16,6		2,5	–	2
Европейские Альпы	Грубен-1 (Gruben Lake 1)	–	–	10,4	–	0,023	0,24	–	–	–	–	5
р. Иссык	№ 02.07	235	110	5,9	15,7	0,026	0,155	15,0	0,38	2,1	–	1
р. Дунгуроме	Дунгуроме	220	150	2,5	8,1	0,027	0,067	27,2	0,31	1,5	–	1
р. Бол. Алматинка	№ 013	200	110	5,7	10,0	0,0273	0,014	20,0	0,57	1,8	–	1
Джунгарский Алатау/р. Сарканд	Кокколь, П	254	113	–	17,0	0,0286	0,247	14,9	–	2,2	–	2
р. Алаарча	Топ-Карагач	290	130	5,2	14,8	0,029	0,153	19,6	0,35	2,2	–	1
р. Тургень	№ 01.13	300	135	7,7	18,0	0,04	0,313	16,7	0,43	2,2	–	1
Европейские Альпы	MT (MT Lake)	–	–	12,0	–	0,0416	0,5	–	–	–	–	5
р. Аксу	б/н	300	150	7,7	16,5	0,045	0,346	18,2	0,47	2,0	–	1
р. Чон-Кемин	б/н	320	150	8,0	18,3	0,048	0,384	17,5	0,44	2,1	–	1
р. Лев. Талгар	№ 08	290	155	6,5	12,0	0,0538	0,349	24,2	0,54	1,9	–	1
р. Сут-Булак	Сут-Булак	420	133	10,8	32,0*	0,055	0,537	13,1	0,34	3,2	3540	1
Европейские Альпы	Лак д'Арисн (Lac d'Arisne)	–	–	13,6	–	0,059	0,8	–	–	–	–	5
Кавказ/р. Адылсу	Башкара	1013	260	14,8	34,4*	0,066	1,207	29,4	0,43	3,9	2568	7
Таласский хребет	Балыктысу-3	–	–	–	14,0	0,07	0,41	–	–	–	3620	4
р. Джууку	Джууку-1	450	250	–	9,5	0,073	0,204	47,4	–	1,8	3790	4
р. Джууку	Джууку-2	600	180	–	3,5	0,075	0,13	171,4	–	3,3	3180	4

Кавказ	Бирджалы-Чиран 2006-5	–	–	–	17,0	0,089	0,55	–	–	–	3300	14
р. Исфайрамсай	б/н	450	215	4,1*	12,7*	0,09	3,9*	35,4	0,32	2,1	–	1
Джунгарский Алатау/р. Сарканд	Акколь, О	500	194	–	23,0	0,0967	1,152	21,7	–	2,6	–	2
р. Джашикель	Джашикель-2	–	–	–	2,8	0,1	0,2	–	–	–	–	4
р. Чон-Кемин	б/н	400	260	9,3	17,5	0,1	0,97	22,9	0,53	1,5	–	1
р. Чоктал	б/н	440	330	8,1	18,4	0,103	0,84	23,9	0,44	1,3	–	1
Кавказ	Донгузорункель	1595	320	4,5	15,0	0,105	0,465	106,3	0,30	5,0	2515	7
р. Сарканд	Акколь, П	515	204	–	26,5	0,105	1,513	19,4	–	2,5	–	2
р. Чилик	Кольсай-верхнее	580	190	9,3	23,5	0,108	1,006	24,7	0,40	3,1	2660	3
р. Тоссор	б/н	480	230	15,0	22,1	0,11	1,66	21,7	0,68	2,1	–	1
р. Арабель	Арабель-2	500	300	–	18,5	0,115	0,751	27,0	–	1,7	3820	4
р. Иссык-Ата	Текетор	190	110	10,0	31,0*	0,12	0,126	6,1	0,32	1,7	–	1
р. Джууку	Джууку-5	630	320	–	26,0	0,133	1,27	24,2	–	2,0	3830	4
Терскей-Ала-Тоо/р. Укок	Кольтор	–	–	–	17,0	0,14	1,6	–	–	–	3600	4
р. Исфайрамсай	Тюа-Ашу	700	400	23,0	31,0	0,17	3,8	22,6	0,74	1,8	–	1
р. Джууку	Джууку-6	800	340	–	19,5	0,189	1,225	41,0	–	2,4	3350	4
р. Арабель	Арабель-4	650	400	–	9,5	0,193	0,816	68,4	–	1,6	3910	4
Таласский/ р. Итагар	Мустор	650	450	–	23,0	0,195	1,82	28,3	–	1,4	3010	4
р. Атбаши	Уюрме	–	–	–	8,0	0,21	0,504	–	–	–	3800	4
Джумгал-тоо/р. Джууку	Джууку-3	–	–	–	5,3	0,22	0,419	–	–	–	3760	4
Джумгал-тоо/р. Кольме	Чонташколь	800	380	–	33,0	0,23	3,95	24,2	–	2,1	2590	4
р. Арабель	Арабель-3	1200	350	–	4,5	0,245	0,365	266,7	–	3,4	3800	4
р. Акарт	б/н	1000	400	16,0	34,5	0,26	4,2	29,0	0,46	2,5	–	1
Канада	Ностетуко (Nostetuko Lake)	–	–	28,6	–	0,2622	7,5	–	–	–	–	5
Джумгал-тоо	Башкуганды-коль	–	–	–	22,0	0,264	1,72	–	–	–	2860	4
р. Чилик	Кольсай-ниж., О	1500	193	18,7	37,0	0,29	5,42	40,5	0,51	7,8	1800	3
р. Талас	Каракол	880	550	12,0	38,0	0,32	3,6	23,2	0,32	1,6	–	1
Китайские Гималаи/р. Пойку	№ 5O151B004	800	–	–	–	0,332	8,3	–	–	–	4400	17
р. Чилик	Кольсай-ниж., П	1520	222	17,6	38,6	0,337	5,929	39,4	0,46	6,8	1800	3
р. Чилик	Кольсай-среднее	1150	298	23,2	57,0	0,343	7,95	20,2	0,41	3,9	2250	3
р. Варшидздара	Варшидз	1260	285	27,0	66,0	0,36	9,68	19,1	0,41	4,4	–	1
р. Джууку	Джууку-4	–	–	–	10,0	0,37	1,225	–	–	–	3740	4
Европейские Альпы	Битвин (Between Lake)	–	–	18,8	–	0,4	7,5	–	–	–	–	5
р. Чилик	Богатырь, 07.1972	1500	293	7,7	37,5	0,44	3,4	40,0	0,21	5,1	–	12
Гималаи–Непал	Там-Похари (Tam Pokhari)	1150	500	–	–	0,47	21,25	–	–	–	4432	6
р. Арабель	Бурхан	1500	550	–	10,2	0,493	1,671	147,1	–	2,7	3822	4
Гималаи–Непал	Диг Тшо (Dig Tsho)	1210	440	20,0	–	0,5	10,0	–	–	–	4365	6
Тянь-Шань/р. Талас	Бешташ	1200	600	–	28,0	0,51	5,0	42,9	–	2,0	2997	10
р. Джашикель	Джашикель-3	–	–	–	4,8	0,54	0,857	–	–	–	–	4

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Китай/р. Пумку	Гелхайпуко (Gelhaipuco Lake)	–	–	–	–	0,548	25,45	–	–	–	5270	15
Китай/р. Пумку	Абмачимай-Ко (Abmachimai Co)	–	–	34,3	–	0,565	19,4	–	–	–	5100	15
Гималаи–Непал	Имджа (Imja)	1300	500	47,0	99,0	0,6	28	13,1	0,47	2,6	5000	6
Исландия	Джанупсватн (Gjanupsvatn)	–	–	33,3	–	0,6	30	–	–	–	–	5
р. Чилик	Богатырь, 07.1977	1700	370	10,0	33,0	0,617	6,2	51,5	0,30	4,6	–	1
р. Джашикель	Джашикель-4	–	–	–	15,0	0,657	4,03	–	–	–	–	4
Китай/р. Пумку	Куонгзонк-Ко (Quongzonk Co)	–	–	27,9	–	0,753	21	–	–	–	–	6
Гималаи–Непал	Тхулаги (Thulagi)	2000	450	41,8	81,0	0,76	31,8	24,7	0,52	4,4	4146	6
Гималаи–Непал	Ловер Барун (Lower Barun)	1250	625	50,0	118,0	0,78	28	10,6	0,42	2,0	4570	6
Исландия	Далватн (Dalvatn)	–	–	45,0	–	0,8	20	–	–	–	–	11
р. Джашикель	Джашикель-1	2100	–	–	15,5	0,8	2,18	–	–	–	–	4
р. Джууку	Джууку-2	3200	430	–	10,6	0,84	2,75	301,9	–	7,4	3755	4
Китай/р. Пумку	Куанзонко (Qangzonkco Lake)	–	–	–	–	0,888	21,7	–	–	–	4932	15
Ферганский хребет	Капкаташ	–	–	–	50,0	0,96	2,6	–	–	–	2305	4
Тянь-Шань/Иссык-Куль	Алакель	3000	600	–	73,0	1,34	43	41,1	–	5,0	3532	9
Гималаи–Бутан	Рапстрен-Тшо (Raphstreng Tsho)	–	–	–	–	1,38	66,83	–	–	–	–	6
Гималаи–Непал	Тшо Ролпа (Tsho Rolpa)	3200	500	55,1	131,0	1,39	76,6	24,4	0,42	6,4	4580	6
Китай/р. Пумку	Зонгяко (Zonggyaco Lake)	–	–	–	25,5	1,391	19,5	–	–	–	4935	15
Терскей-Ала-Тоо/р. Укок	Кольукок	2700	–	–	63,0	1,4	31,4	42,9	–	–	3048	4
Приэльбрусье/р. Баксан	Сылтран	600	260	14,0	36,2	1,58	2,2	7,2	–	2,3	3186	16
Европейские Альпы	Лагуна Парон (Laguna Paron)	–	–	46,9	–	1,6	75	–	–	–	–	5
Тянь-Шань/р. Чу	Кельукок	3000	690	–	55,0	1,6	34	54,5	–	4,3	3048	9
Исландия	Ватнсдалур (Vatnsdalur)	–	–	–	110,0	1,9	120	–	–	–	–	11
Тянь-Шань/р. Бол. Нарын	у л. Петрова, 1995 г.	–	–	8,3	24,0	2,784	23,127	–	0,35	–	3734	10
Тянь-Шань/р. Карадарья	Кулун	4600	1480	–	91,0	3,28	118	50,5	–	3,1	2861	9
Тянь-Шань/р. Бол. Нарын	у л. Петрова, 2005 г.	–	–	–	69,6	3,42	52	–	–	–	3734	12
Ферганский хребет	Карасуу	–	–	–	153,0	4,2	223,5	–	–	–	1998	9
Европейские Альпы	Саммит (Summit Lake)	–	–	50,0	–	5,0	250	–	–	–	–	5
Исландия	Нупелон (Nupelon)	–	–	20,0	–	5,0	100	–	–	–	–	11
Европейские Альпы	Фантом (Phantom Lake)	–	–	83,3	–	6,0	500	–	–	–	–	5
Кокшаал-тоо	Кольсу	10000	200	–	20,0	12,0	150*	500,0	–	50,0	3510	4

Примечание. L – длина; W – ширина; H_{mean} – средняя глубина; H_{max} – максимальная глубина; F – площадь озера; V – объем; $M = H_{mean}/H_{max}$; П – прорыв; О – обследование; б/н – без названия; Z – высота над уровнем моря, м; * – сомнительное значение. Номера в графе Ref указывают на источник информации: 1 – [*Керемкулов, 1985*]; 2 – [*Тихомиров, Шевырталов, 1985*]; 3 – [*Мочалов, Шевырталов, 1988*]; 4 – [*Озера..., 1980*]; 5 – [*Huggel et al., 2002*]; 6 – [*Inventory..., 2005*]; 7 – [*Зимницкий, 2005*]; 8 – [*Глазырин и др., 2005*]; 9 – [*Ермолов, Стависский, 1973*]; 10 – [*Усубалиев, Ерохин, 2006*]; 11 – [*Виноградов, 1980*]; 12 – [*Марков, Попов, 1985*]; 13 – [*Зимницкий, Николайчук, 2006*]; 14 – [*Черноморец и др., 2007б*]; 15 – [*Wu Lizong et al., 2003*]; 16 – [*Крыленко и др., 2008*]; 17 – [*Inventory..., 2004*].

сейнах рек Вахш и Пяндж, состоит в том, чтобы выявить новые возможности использования спутниковых изображений для получения следующих характеристик высокогорных озер: площади, объема, максимального расхода прорывной волны. Для целей каталогизации и мониторинга прорывоопасных озер Памира средствами аэрокосмического зондирования наиболее подходящим является упрощенный метод расчета максимального расхода прорывной волны Q_{max} как эмпирической функции индекса подпруживания (dam-factor), равного произведению объема озера на высоту плотины [*Costa, 1985*].

В работах [*Huggel et al., 2002, 2004; Huggel, 2004*] предлагается находить объем озера в зависимости только от его площади, которая легко определяется по данным дистанционного зондирования. Однако анализ результатов показывает, что одномерные зависимости $V = f(F)$ и $Q_{max} = f(V)$, т. е. фактически $Q_{max} = f(F)$, не обеспечивают удовлетворительного качества расчета Q_{max}. Здесь F – площадь озера; V – его объем. Кроме того, статистические выборки, использованные в работах [*Huggel et al., 2002, 2004; Huggel, 2004*] для получения эмпирических зависимостей $V = f(F)$ и $Q_{max} = f(V)$, представляются недостаточно репрезентативными по составу и размеру. В связи с этим был предпринят поиск морфометрических характеристик прорывоопасных высокогорных озер гляциального генезиса в опубликованных материалах. В итоге была собрана представительная база данных по 141 озеру (табл. 1). База данных включает следующие характеристики озер: расположение, длина, ширина, средняя (H_{mean}) и максимальная (H_{max}) глубина, площадь, объем, ряд обобщенных параметров формы объекта (отношения длины к максимальной глубине, длины к ширине, средней глубины к максимальной), высота над уровнем моря. Диапазон изменения площади от 0,000 04 до 12 км^2, объема – от 0,000 04 до 500 млн м^3, средней глубины – от 0,4 до 83,3 м.

МЕТОД РАСЧЕТА

С целью определения объема озера как функции морфометрических характеристик были использованы одномерные и многомерные, линейные и нелинейные варианты аналитической аппроксимации. Поиск был проведен для исходных данных, распределенных на четыре группы, согласно условиям: $F < 0{,}01$; $0{,}01 \le F < 0{,}2$; $0{,}2 \le F < 1{,}0$; $1{,}0 \le F \le 12{,}0$, где F – площадь озера, км^2. В итоге установлено, что кусочно-линейная аппроксимация обеспечивает наилучшее приближение функций $V_1 = f(H_{max}, F)$ и $V_2 = f(H_{mean}, F)$ во всех четырех диапазонах значений F. Общий вид уравнений для расчета объема озер следующий:

$$V_1 = a_1 H_{max} + b_1 F + c_1; \quad (1)$$

$$V_2 = a_2 H_{mean} + b_2 F + c_2. \quad (2)$$

Для малых значений аргументов в первых двух диапазонах F, когда возможны отрицательные значения функции, получены одномерные формулы для $V = f(F)$:

$$V_{I} = 5 \cdot 10^{-7} e^{2{,}8221F}; \quad (3)$$

$$V_{II} = 6 \cdot 10^{-7} e^{2{,}6544F}. \quad (4)$$

Здесь I–II – номера диапазонов; коэффициент детерминации для уравнений (3) и (4) равен 0,729 и 0,911 соответственно.

Параметры эмпирических формул (1), (2) были определены по методам Ньютона и Розенброка–Ньютона. Коэффициенты a_1, b_1, c_1 и a_2, b_2, c_2, полученные для расчета объема прорывоопасных озер гляциального генезиса, приведены в табл. 2.

Таблица 2. **Параметры эмпирических кусочно-линейных формул для расчета объема прорывоопасного озера**

Диапазоны	F, км^2	Аргументы для V	Параметры 1-го варианта формулы			Параметры 2-го варианта формулы			Breakpt	$R^2(V)$, %
			c_1	$a_1 \to x_1$	$b_1 \to x_2$	c_2	$a_2 \to x_1$	$b_2 \to x_2$		
I	$F < 0{,}01$	$x_1 = H_{mean}$; $x_2 = F$	–0,00200	0,00110	2,25038	–0,04445	0,00902	2,89530	0,03089	99,09
		$x_1 = H_{max}$; $x_2 = F$	–0,00068	0,00045	0,91793	–0,02623	0,00277	3,65540	0,00750	97,99
II	$0{,}01 \le F < 0{,}2$	$x_1 = H_{mean}$; $x_2 = F$	–0,28750	0,05894	5,14606	3,130103	–0,05141	10,8966	3,79990	95,56
		$x_1 = H_{max}$; $x_2 = F$	–0,14291	0,01586	3,57272	–2,19530	0,10992	9,48921	0,55312	87,82
III	$0{,}2 \le F < 1{,}0$	$x_1 = H_{mean}$; $x_2 = F$	–5,65060	0,36538	14,6758	20,9952	0,24069	–7,40877	13,86550	99,97
		$x_1 = H_{max}$; $x_2 = F$	0,90492	0,09124	0,02662	–8,01254	0,00308	51,63116	6,99765	95,87
IV	$1{,}0 \le F < 12{,}0$	$x_1 = H_{mean}$; $x_2 = F$	–58,9346	1,92809	24,0612	54,1412	9,04842	–51,31250	170,7878	99,97
		$x_1 = H_{max}$; $x_2 = F$	–5,57720	0,55569	5,51999	–72,8570	1,49324	16,11118	96,63651	99,87

Примечание. F – площадь озера; V – объем, млн м^3; H_{mean}, H_{max} – соответственно средняя и максимальная глубина озера, м; Breakpt – критерий для выбора варианта эмпирического уравнения (при $V \le$ Breakpt применяется 1-й вариант формулы, при $V >$ Breakpt – 2-й вариант); $R^2(V)$ – объясняемая часть дисперсии функции.

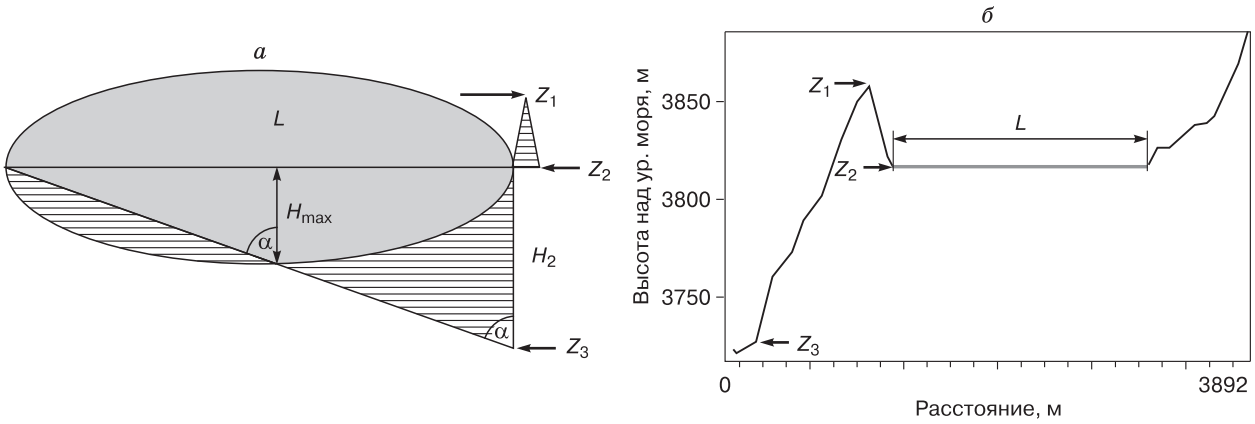

Рис. 1. Аппроксимация вертикального профиля глубины по продольной оси высокогорного озера (*а*) и вертикальный профиль абсолютной высоты для долины и поверхности одного из озер в бассейне р. Гунт (Горный Бадахшан, Памир) (*б*).

Z_1 – абсолютная высота плотины над уровнем моря; Z_2 – абсолютная высота уреза воды; Z_3 – минимальная отметка подпруживающей плотины над уровнем моря; L – длина озера; $H_2 = Z_2 - Z_3$; H_{max} – максимальная глубина.

Там же даны пороговые значения объемов, которые используются для выбора вариантов расчетных уравнений. Как видно, статистические оценки качества уравнений $V = f(H_{mean}, F)$ и $V = f(H_{max}, F)$ оказались практически одинаковыми. Наибольший практический интерес представляет формула $V = f(H_{max}, F)$, поскольку для определения максимальной глубины (H_{max}) достаточно данных дистанционного мониторинга высокогорных озер, если принять следующие положения: 1) максимальная глубина озера находится вблизи середины озера; 2) продольный вертикальный профиль глубины озера от его начала и до подпруживающей плотины может быть аппроксимирован полуэллипсом, вписанным в прямоугольный треугольник (рис. 1, *а*). Оба положения основаны на обобщении результатов батиметрических съемок высокогорных озер, содержащихся в работах [*Озера..., 1980; Черноморец и др., 2007а; Yamada, 1998*]. Определение величины H_{max} и максимального расхода прорывной волны при катастрофическом сбросе воды из озера состоит из следующих этапов.

1. Идентификация контура озера на снимке со спутников LANDSAT 7 ETM+ или TERRA и оцифровка его в географических координатах.

2. Наложение контура на цифровую модель рельефа и определение с помощью ГИС площади озера (F), его длины (L) и абсолютной высоты уреза воды у плотины (Z_2), верхней (Z_1) и нижней (Z_3) отметок плотины, разность которых дает высоту плотины $\Delta Z = Z_1 - Z_3$.

3. Расчет максимальной глубины озера по формуле

$$H_{max} = \frac{L}{2}\frac{1}{\mathrm{tg}(\mathrm{arctg}(L/H_2))}, \qquad (5)$$

где $H_2 = Z_2 - Z_3$.

Для получения формулы (5) использованы геометрические соотношения между сторонами и углами прямоугольного треугольника и достаточно реалистичное условие постоянства угла наклона склона α по длине L. Тогда в обозначениях рис. 1, *а*: $\mathrm{tg}\alpha = L/H_2$, где значения L и H_2 полагаем известными в результате обработки дистанционного изображения озера. Для расчета H_{max} на середине длины L использована другая формула геометрии прямоугольного треугольника, которая применительно к нашей задаче записана в виде $H_{max} = 0{,}5L\mathrm{ctg}\alpha$. Отсюда понятно, как получено уравнение (5).

4. Определение объема озера с помощью одного из вариантов формулы $V = f(H_{max}, F)$ в табл. 2, соответствующей заданной площади F и пороговому значению объема.

5. Расчет максимального расхода прорывной волны по формуле Коста [*Costa, 1985*]:

$$Q_{max} = 3{,}8(\Delta ZV)^{0{,}61}. \qquad (6)$$

Коэффициент детерминации для уравнения (6) равен 0,79.

Определение длины озера L, высоты подпруживающей плотины ΔZ и других аргументов в формуле (5) следует выполнять с помощью программных модулей ГИС ENVI путем наложения векторного контура озера на цифровую модель рельефа, доступную в рамках глобального проекта SRTM30 (Shuttle Radar Topography Mission: *http://seamless.usgs.gov/*). Затем в пределах контура озера задается положение продольного профиля, вдоль которого соответствующий модуль ГИС ENVI определяет планово-высотные координаты заданных пунктов. В результате для выбранной части территории речного бассейна получаем вер-

тикальный профиль высот рельефа, на котором хорошо видны поверхность озера, подпруживающая плотина и участки бассейна выше и ниже озера (см. рис. 1, *б*). Для расчета площади озера по его оцифрованному контуру следует использовать стандартные программы, имеющиеся в составе различных ГИС. Далее в зависимости от площади озера выбираем подходящую формулу и находим объем озера.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Исследование распространения высокогорных гляциогенных озер в верховье Амударьи показало, что одним из наиболее подходящих применений системы мониторинга этих озер является защита г. Хорог – столицы Горно-Бадахшанской автономной области Таджикистана от последствий катастрофического сброса воды из многочисленных озер в бассейнах рек Гунт и Шахдара (рис. 2). Повсеместно здесь на склонах и в поймах рек в состоянии значительной гравитационной неустойчивости находятся рыхлые и слабосцементированные отложения, которые при избыточном увлажнении служат благоприятной средой для развития оползней и селей. Эти явления создают угрозу для населения и экономики независимо от существования озер. Например, мощный сель в начале августа 1962 г., который временно перекрыл р. Гунт с расходом воды 176 м^3/с [*Тукеев, 2002*].

По мере снижения прочности плотины прорывоопасные озера в гляциальных областях Памира можно разделить на моренные, моренно-ледниковые и ледниковые. Первые расположены в устойчивых понижениях рельефа морены различного возраста и плотина у этих озер состоит из более или менее сцементированного осадочного и обломочного материала. Моренно-ледниковые озера примыкают к концевой части ледника и вода

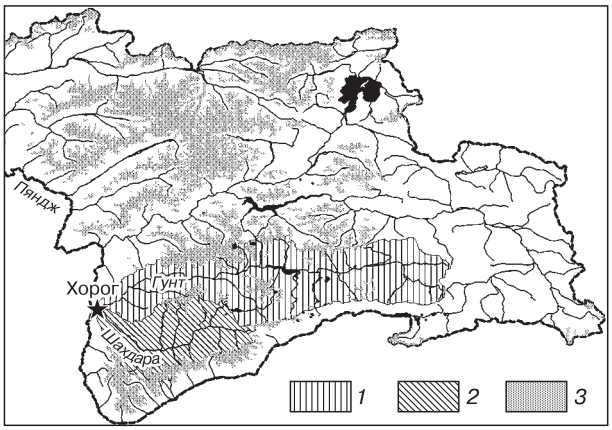

Рис. 2. Гидрографическая схема бассейнов рек Гунт, Шахдара и сопредельной территории Памира.

1 – р. Гунт; *2* – р. Шахдара; *3* – оледенение.

в них подпружена плотиной из рыхлой современной морены. Плотина может включать ледяное ядро. Ледниковые озера относительно недолговечны и возникают вследствие динамики самого ледника (отступание, наступание, быстрые подвижки). Плотину образует тело ледника.

Известно, что причиной прорыва моренных и моренно-ледниковых озер может быть разрушение плотины вследствие экстремального притока талой воды, а также попадания в озеро лавинных, селевых и оползневых масс [*Виноградов, 1977; Тукеев, 2002*]. Следовательно, наличие озер может служить как основным фактором образования прорывной волны и (или) селя, так и многократно усилить селевой процесс, разрушивший озерную плотину. В том и другом случае задачей системы защиты г. Хорог является оценка максимального расхода прорывной волны при разрушении плоти-

Таблица 3. **Расчеты максимального расхода прорывной волны**

Озеро	Площадь (F, км^2)	Максимальная глубина (H_{max}, м)	Объем (V, млн м^3)	Максимальный расход прорывной волны (Q_{max}, м^3/с)
Турумтайкуль	10,275	53,5	80,869	627,81
Зарашкуль	5,731	28,5	41,894	286,26
Чандара	3,285	37,5	36,375	310,48
24*	1,982	8,0	9,809	54,39
25*	1,198	7,0	4,925	32,94
Риванкуль	1,134	67,0	37,980	454,17
34*	1,093	24,0	13,793	130,89
18*	0,810	65,0	6,857	156,93
27*	0,734	12,0	2,053	26,83
14*	0,549	13,0	2,106	28,61

* Условный номер безымянного озера.

ны одного или нескольких вышерасположенных гляциогенных озер. Эти сведения для ряда озер в бассейне р. Гунт получены путем применения описанных выше методов и приведены в табл. 3.

Впервые полученные оценки объема и максимального расхода прорывной волны для высокогорных озер в бассейне р. Гунт показывают, что эти водоемы представляют реальную угрозу для г. Хорог и других населенных пунктов Горно-Бадахшанской АО Республики Таджикистан. Максимальный расход прорывной волны сравним (и даже превышает) с максимальными значениями расхода воды р. Гунт (гидропост Хорог) в июне, июле, августе, равными 468, 552, 335 м^3/с соответственно. Все населенные пункты в бассейне р. Гунт расположены в пределах досягаемости прорывной волны, которая распространяется с сохранением разрушительной силы на расстояние до 100 км и более [*Yamada, 1998; Sakai, 2000; Horstmann, 2004*].

РЕКОМЕНДАЦИИ

Изложенная методика расчета параметров потенциально прорывоопасных высокогорных озер открывает новые возможности для совершенствования системы превентивных мер по уменьшению ущерба от стихийных природных явлений в бассейнах рек Памира. Предлагаемая система не имеет аналога на территории Памира. Среди осуществленных зарубежных проектов можно сослаться на комплекс мер по уменьшению риска прорыва высокогорного озера Тшо Ролпа в Непале [*Yamada, 1998; Mool et al., 2001*]. До начала создания системы в бассейне р. Гунт следует провести предпроектные исследования и полевые работы для определения технических характеристик системы и ее ориентировочной стоимости, подготовки комплексного научно-производственного обоснования системы. Первая очередь системы должна включать: а) базу данных о распространении прорывоопасных озер в бассейне р. Гунт и их морфометрических параметрах; б) базу данных о современном оледенении в бассейне; в) сведения об объектах, подверженных ущербу в результате стихийных природных явлений; г) климатические, гидрологические и почвенно-геологические характеристики бассейна р. Гунт и сопредельных территорий, имеющие значение для оценки состояния высокогорных озер и прогноза их прорыва. В составе второй очереди системы должны быть пилотные разработки методов прогноза ситуаций, благоприятных для прорыва высокогорных озер, с оценками вероятностей события, а также рекомендации по уменьшению ущерба от стихийных природных явлений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 05-05-64296, 08-05-00661).

Литература

Батыров Р.С., Яковлев А.В. Использование цифровых космических снимков ASTER TERRA для определения гляциальных озер // Тр. НИИ. Ташкент, 2004, вып. 3 (248), с. 14–21.

Виноградов Ю.Б. Гляциальные прорывные паводки и селевые потоки. Л., Гидрометеоиздат, 1977, 155 с.

Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Л., Гидрометеоиздат, 1980, 144 с.

Глазырин Г.Е., Карташов Д.А., Муракаев Р.Р. и др. Результаты исследования прорывоопасных ледниковых озер в бассейне р. Пскем летом 2003 г. // Тр. НИИ. Ташкент, 2005, вып. 5 (250), с. 43–55.

Ермолов А.А., Стависский Я.С. Озера за облаками. Фрунзе, Изд-во "Кыргызстан", 1973, 44 с.

Зимницкий А.В. Современное состояние и динамика приледниковых озер бассейна р. Баксан // Тезисы докл. XIII Гляциол. симпозиума "Сокращение гляциосферы: факты и анализ". СПб., 2004, с. 72.

Зимницкий А.В. Формирование, распространение и динамика приледниковых озер Западного и Центрального Кавказа: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Краснодар, 2005, 22 с.

Зимницкий А.В., Николайчук А.В. Современное оледенение и приледниковые озера в верховьях Малки (Центральный Кавказ) // Изменения природной среды на рубеже тысячелетий: Тр. Междунар. электрон. конф. Тбилиси; Москва, Полиграф, 2006, с. 35–40.

Керемкулов В.А. Морфометрические характеристики и классификация моренных озер // Селевые потоки. М., 1985, вып. 9, с. 36–47.

Крыленко И.Н., Сурков В.В., Тарбеева А.М., Крыленко И.В. Морфология озера Сылтран (бассейн р. Баксан) и оценка его прорывоопасности // Тр. Междунар. конф. "Селевые потоки: Катастрофы, риск, прогноз, защита". Пятигорск, Ин-т Севкавгипроводхоз, 2008, с. 305–308.

Марков Н.Н., Попов Н.В. Динамика озер бассейна р. Чилик и возможность их прорыва // Селевые потоки. М., 1985, вып. 4, с. 107–113.

Мочалов В.П., Шевырталов Е.П. Прорывной паводок в бассейне р. Кольсай 2 июня 1984 г. // Селевые потоки. М., 1988, вып. 10, с. 150–155.

Никитин А.М. Морфометрия и морфология озер Средней Азии // Тр. САРНИГМИ, 1977, вып. 50 (131), с. 4–21.

Никитин А.М. Водные ресурсы и водный баланс озер и водохранилищ Средней Азии // Тр. САРНИГМИ, 1986, вып. 108 (189), 95 с.

Озера Тянь-Шаня и их история / Под ред. А.В. Шнитникова. Л., Наука, 1980, 230 с.

Тихомиров Ю.П., Шевырталов Е.П. Некоторые характеристики гляциального селя, прошедшего в бассейне р. Сарканд // Селевые потоки. М., 1985, вып. 9, с. 132–138.

Тукеев О.В. Селевые явления Памира: Катастрофа, закономерности, прогноз. М., 2002, 176 с.

Усубалиев Р.А., Ерохин С.А. Высокогорные озера как следствие деградации современного оледенения // Гляциология в канун Международного полярного года (Пушкинские Горы Псков. обл., 9–12 окт. 2006 г.): Тезисы докл. М., Гляциол. ассоц., 2006, с. 41.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Крыленко И.В. и др. Динамика ледниково-озерного комплекса Башкара и оценка селевой опасности в долине реки Адыл-су (Кавказ) // Криосфера Земли, 2007а, т. XI, № 1, с. 72–84.

Черноморец С.С., Петраков Д.А., Тутубалина О.В. и др. Прорыв ледникового озера на северо-восточном склоне Эльбруса 11 августа 2006 г.: прогноз, событие и последствия // Материалы гляциол. исслед., 2007б, вып. 102, с. 225–229.

Costa J.E. Floods from dam failures. Denver, Colorado, 1985, 54 p. (Open-File Rep. 85-560).

Horstmann B. Glacial Lake Outburst Floods in Nepal and Switzerland // New Threats Due to Climate Change. Germanwatch, Berlin, Germany, 2004, 12 p.

Huggel C. Assessment of Glacial Hazards based on Remote Sensing and GIS Modeling: PhD Diss. Zürich, Switzerland, Geograph. Inst. der Univ. Zürich, 2004, 87 p.

Huggel C., Kääb A., Haeberli W. et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps // Can. Geotech. J., 2002, No. 39, p. 316–330.

Huggel C., Kääb A., Haeberli W., Krummenacher B. Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps // Natural Hazards and Earth System Sci., 2003, No. 3, p. 647–662.

Huggel C., Kääb A., Salzmann N. GIS-based modeling of glacial hazards and their interactions using Landsat-TM and IKONOS imagery // Norweg. J. Geography, 2004, vol. 58, p. 61–73.

Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan Region Poiqu Basin, China Himalayas. Lanzhou, China, Cold and Arid Reg. Environ. and Eng. Res. Inst., 2004, 60 p.

Inventory of glaciers, glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of India, Pakistan and China/Tibet Autonomous Region. Nepal, Katmandu, ICIMOD, APN, 2005, 48 p.

Lindsay D. Englacial hydrology related to an outburst flood from Hidden Creek Lake, a Glacially-dammed Lake in Alaska: Thes. ... MS Geol. Portland, USA, Portland State Univ., 2003, 111 p.

McKillop R.J. Objective preliminary assessment of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia: Thes. ... MS. Vancouver, Canada, Simon Frazer Univ., 2005, 153 p.

Mool P.K., Bajaracharya S.R. Tista Basin, Sikkim Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region. Nepal, Katmandu, ICIMOD, 2003, 145 p.

Mool P.K., Bajaracharya S.R., Joshi S.P. Risk assessment of Tsho Rolpa Glacial Lake along the Rolwaling and Tama Koshi Valleys Dolakha District. Nepal, Katmandu, ICIMOD, 2001, 75 p.

Mool P.K., Bajaracharya S.R., Roohi R. et al. Upper Indus, Jhelum, Shingo, Shyok, and Shigar River basins. Pakistan Himalaya. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan region. Nepal, Katmandu, ICIMOD, 2004, 354 p.

Sakai A., Chikita K., Yamada T. Expansion of a moraine-dammed glacial lake, Tsho Rolpa, in Rolwaling Himal, Nepal Himalaya // Limnology and Oceanography, 2000, vol. 45, No. 6, p. 1401–1408.

Wu Lizong, Che Tao, Jin Rui et al. Inventory of glaciers and glacial lakes and the identification of potential glacial lake outburst floods (GLOFs) affected by global warming in the mountains of Himalayan Region. Lanzhou, China, Cold and Arid Reg. Environ. and Eng. Res. Inst., 2003, 160 p.

Yamada T. Glacial Lake and its outburst flood in the Nepal Himalaya. Tokyo, Japan, Data Center for Glacier Res., Jap. Soc. of Snow and Ice, 1998, 96 p.

Поступила в редакцию
23 февраля 2009 г.