

First Break Special Topic Специальная тема

Одна из целей предстоящего в ООН проекта о Планете Земля в 2008 году состоит в развитии понимания важности геофизических исследований в решении каждодневных проблем.

Мы имеем три очень разных темы в этом месяце, иллюстрирующих приповерхностные условия и геофизические исследования. Возможно самое интригующее – это вклад профессора Джона Рейнольдса (также выступавшем ранее в этом выпуске), который обсуждает в своей работе научный подход к оценке опасности ледников и ее уменьшения, со специфическими рекомендациями. Это заслуживает нашего внимания, поскольку Рейнольдс применяет этот геофизический опыт в работе, чтобы принести пользу обществу, который многие практически не используют в современном мире, те, кто плохо понимает степень опасности, которой они подвергают свою жизнь. Кроме того, это – хороший урок для молодых людей нашедших «изюминку» в участии при решении возникающих проблем научным путем.

Дирк Орловский и коллеги описывают относительно простую технику для характеристики ВЧР. Это может быть просто, но, тем не менее, важно. Практические решения, взятые из этой статьи, например, где описывается съемка на потенциально нестабильной площадке, из-за предыдущей практики захоронения отходов, показывают уместность и необходимость геофизических исследований.

В нашей последней теме Гарри Андерсон описывает преимущества улучшенного геохимического представления, развитого Гором. Четыре практических примера в тексте – картирование областей экологического загрязнения, оценка утечки трубопроводов, так же как нефтяные и рудные поисково-разведочные работы – указывают на стабильное будущее для техники, которая может дать вдохновение новому поколению молодых людей.

Будущие Специальные темы

Январь	<i>IT/ Управление Данными</i>
Февраль	<i>Наземная Сейсморазведка</i>
Март	<i>Интерпретация и Визуализация Данных</i>
Апрель	<i>Нефтяная Геология</i>
Май	<i>Скважинная сейсморазведка</i>
Июнь	<i>Мультидисциплинарное издание</i>
Июль	<i>Образование и Обучение / Рудные исследования</i>
Август	<i>Экологические и Технические Геофизические исследования</i>
Сентябрь	<i>Обработка данных</i>
Октябрь	<i>Геофизические исследования Коллектора и Разработка</i>
Ноябрь	<i>Несейсмические Методы / Аэрогеофизика</i>
Декабрь	<i>Морская Сейсморазведка</i>

Наука об окружающей среде и инженерная наука

Роль геофизики в оценке опасности ледников**Role of geophysics in glacial hazard assessment**

John M. Reynolds из Reynolds Geo-Sciences,* объясняет, какую важную роль могут иметь геофизические методы в понимании опасности ледников, мало обсуждаемую, но потенциально бедственную угрозу обществу в гористых регионах мира и вне их.

Изменение климата, независимо от причин этого изменения, вызывает сход ледников (пример. IPCC, 2001) и формирование ледниковых озер в высокогорных цепях мира. В течение этого времени, формируется большинство озер, и растет их объем. Одновременно с этим, катастрофическое разрушение дамбы конечных морен таких озер происходит все более и более часто особенно в Гималаях, есть примеры также в Альпах и североамериканских Скалистых горах и из других районов. В традиционном прорыве ледникового озера (GLOF), приблизительно 15-50 миллионов м³ воды и обломков породы могут быть низвергнуты нисходящим потоком и нанести большой ущерб и разрушения, в некоторых случаях на сотни километров. Максимальный расход может превысить 10 000 м³/с вниз по речным каналам, но он чаще распределяется до нескольких сотен м³/с для пиковых значений потоков муссона. Волны прорыва до десятков метров высотой могут передвигаться со скоростью до десятков километров в час, во время наводнения в период от одного до нескольких дней.

Результаты таких событий могут ощущаться в течение многих десятилетий.

Какова опасность ледников?

Когда ледник или связанные с деятельностью ледников процессы оказывают неблагоприятное влияние на человеческую жизнедеятельность, прямо или косвенно, это, как полагают, является опасностью (Рейнольдс, 1992). Она охватывает человеческую жизнедеятельность от высокогорных фермеров в Перу или Швейцарии, например, лавины угрожают их средствам к существованию (и жизни), до влияния на окружающую среду от удара айсберга по нефтяным платформам на шельфе Лабрадора и катастрофических ледниковых прорывов, разрушающих исландские дорожные коммуникации, до отступления ледника, приводящему к скоплению большой массы воды позади хрупких дамб конечной морены на больших высотах, типа в Анд в Перу, Гималаев, Тянь-Шаньских Гор, Памире, и т.д. То, что вызывает сильное беспокойство в гористых областях, особенно в развивающихся

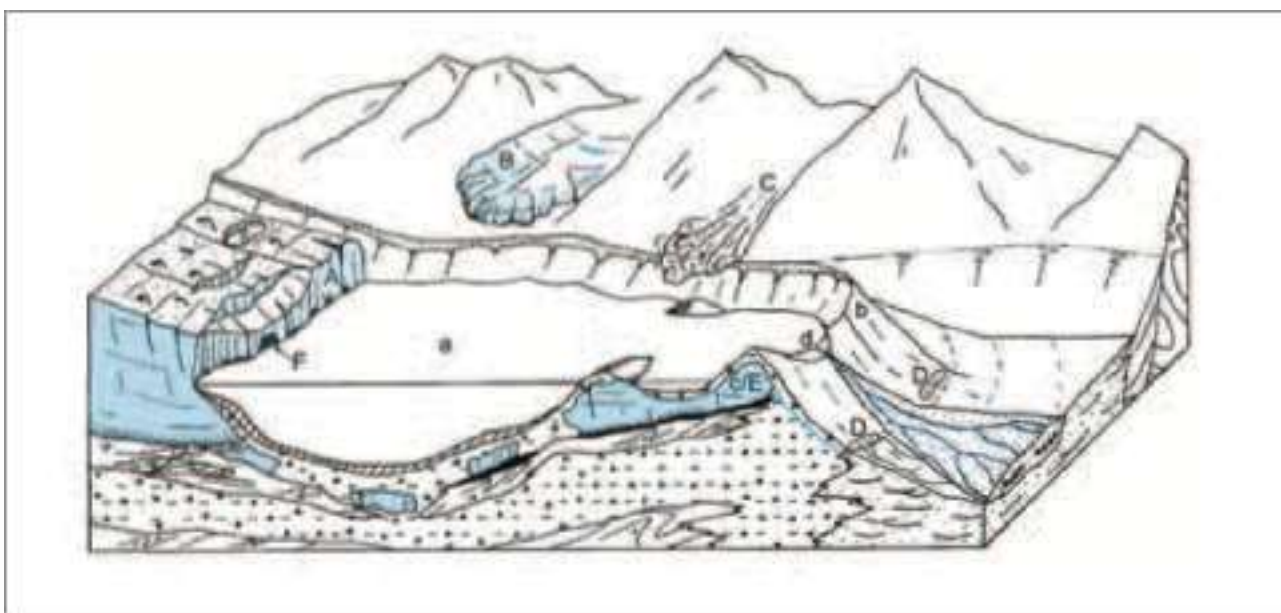


Рис.1 Схематичная диаграмма опасной дамбы морены высокогорного ледникового озера. Факторы, составляющие опасность включают: (а) большой водный объем озера, (б) узкая и высокая дамба морены, (с) неподвижный лед ледника в пределах дамбы, и (d) ограниченный надводный борт запаса дамбы между уровнем озера и гребнем хребта морены. Потенциальные провоцирующие факторы ледникового выброса (наводнения) включают лавинные волны смещения от (А) айсбергообразующего ледника, (В) висящего ледника, и (С) камнепада; (D) осаднения и/или эрозии в пределах дамбы (из-за активного просачивания или сейсмической активности); (Е) тающей коры ледника; и (F) катастрофического дренажа в озеро от подледниковых или внутриледниковых каналов или более ранних ледниковых озер (Ричардсон и Рейнольдс, 2000).

Наука об окружающей среде и инженерная наука

first break том 24, Август 2006



Рис 2 GLOF прорыв в Sabai Tsho, в Непале. Размер морены и ее разрушение может быть измерено в сравнении с реальным размером зданий на переднем плане.

особенно в развивающихся странах, является область опасностей связанных с до- и внутри- ледниковыми озерами, которые могут привести к разрушительному GLOF.

Компоненты системы озера ледников показаны на рисунке 1, и они включают две группы - граничные особенности, типа конечных и боковых морен непосредственно и их состав и структуру, действительно ли они содержат медленно тающий лед ледника. Вторая совокупность состоит из особенностей, которые могут вызвать процессы, которые могли бы привести к разрушению дамбы морены, например, волна выше морены, являющаяся результатом смещения воды озера от лавины горной породы или льда. Такие волны могут быть огромными. Например, в Safuna Alta в Cordillera Blanca, Перу, 22 апреля 2002, лавина массивной неслоистой породы обрушилась на небольшой ледник и в его над-ледниковое озеро, превратив фактически половину озера в волну, в конечном счете, приблизительно 110 м. высотой, которая была выше дамбы морены и своей массой принесла большие убытки (Hubbard и др., 2005). Обычно, намного меньшая волна (2-5 м) может быть выше морены, и приводит к регрессивной эрозии отдаленного от центра края, создавая новое место истечения, которое очень прорывоопасно. Получающиеся рифы морены могут быть очень внушительными (Рис 2). В других случаях, тающий неподвижный лед ледника, захороненный в пределах морены вызывает оседание дамбы, в конечном счете приводящей к ее физическому разрушению.

Исторические события

В Гималаях, в течение 1960-ых 1940-ых, как сообщается, один существенный GLOF, происходил раз в десятилетие. К 1990-ым, это стало случаться раз в три года; к 2010 ожидается, что GLOF вызывающий ущерб больше чем 1 миллион \$ долларов будет происходить каждый год (Richardson и Рейнольдс, 2000). Если один из этих GLOF затронет крупный гидроэлектрический нефтепромышленный государственный объект, который успешно работал в течение десятилетия, то по оценке, стоимость повреждений может превысить 500 миллионов \$. Для развивающийся страны, типа Непала,

занимающего четвертое место в мире по бедности, такое событие могло бы задержать его экономическое развитие более чем на десятилетие, угрожая его экономическому выживанию.

В Перу, например, главная гидроэлектростанция, которая подает большую часть электрической энергии к городу Трухильо, третьему по величине городу страны, является потенциально уязвимой от воздействия GLOF (Рейнольдс, 1998). В 1998 гидроэлектростанция в Мачибучи была разрушена вызванным ледником потоком обломков породы, приведя к более чем 200 миллионов \$ убытков и затрат на восстановление. Более чем 32 000 человек погибли в одном только Перу за прошлое столетие из-за этих известных аллювиальных сходов, в Южной Америке (Рейнольдс, 1992), которые все еще опасны.

В 1994 году, Luggye Tsho в северном Бутане высвободилось и прорвалось 18 миллионов м³, которые потекли в северную Индию более чем на 200 км, погиб 21 сельский житель Брутана в Пунакхе. Соседнее ледниковое озеро ледника Thorthormi - в настоящее время самое опасное ледниковое озеро в Бутане и может низвергнуть свыше 50 миллионов м³ по тому же самому речному каналу, который ведет в Индию и возможно даже в Бангладеш. Много тающих ледниковых озер из одной страны стекают в реки, которые текут в другую страну и создают интересные геополитические проблемы расчета рисков, но это - другая публикация!

Гималаи видятся как новый источник энергии для Средней Азии, экспорта энергии в Индию и вне ее. Развитие таких возможностей также приносит увеличение развития сельского хозяйства и лучшую инфраструктуру, привлекающую людей из большего количества сельских районов, поскольку лучшие дорожные коммуникации делают транспортировку рыночных товаров легче. Следовательно, проекты масштаба за больше чем 1 миллиард \$ обычно приводят к концентрации инфраструктуры и общества в уязвимые низины. Взятие двух факторов, увеличивающиеся опасности прорыва ледников с растущей уязвимостью означает, что глобальные риски в этих условиях, в некоторых случаях, становятся критически опасными для тысячи жизней и миллионов долларов инвестиций.

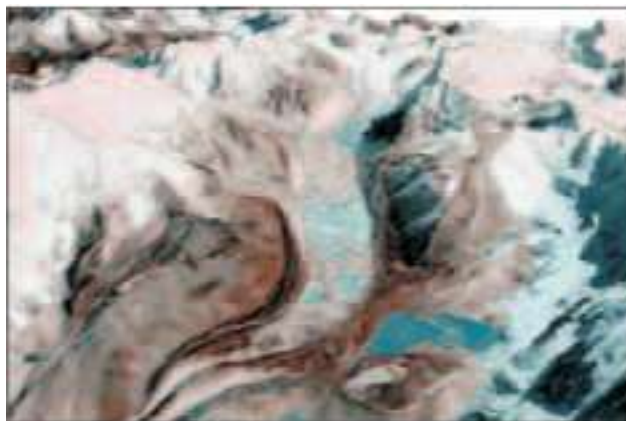


Рис 3 Перспективное 3Д изображение Ледника Drogpa Nagtsang, Manlung, Chhu, Тибет (Китай) полученное из спутниковых снимков, наложенных на Цифровую Оценочную Модель. Такие изображения могут использоваться, чтобы помочь моделировать проекты наземных исследований.

Наука об окружающей среде и инженерная наука

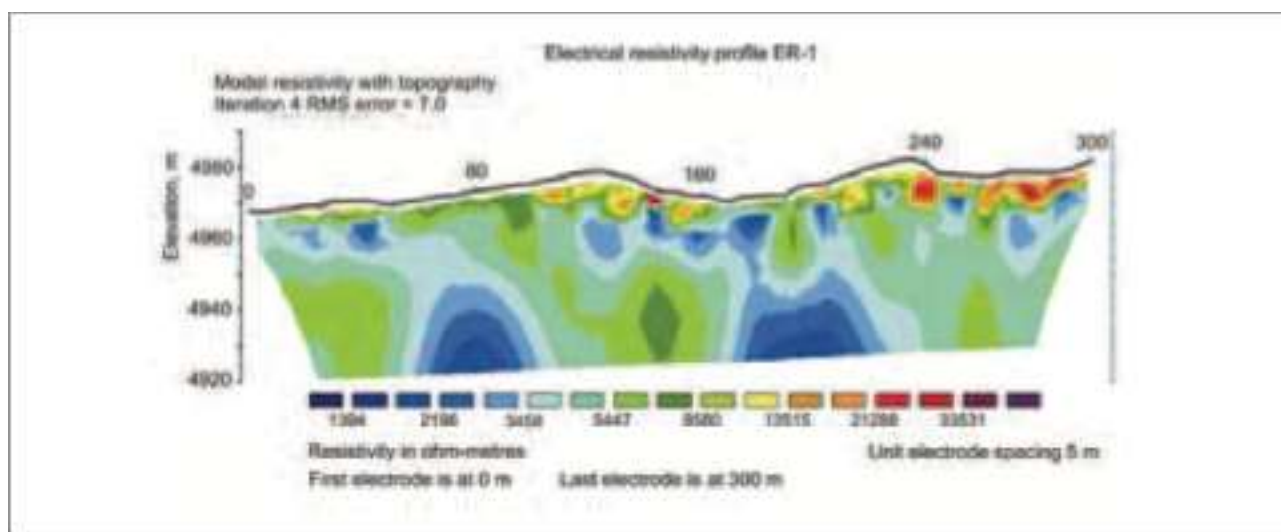


Рис 4 Томограмма удельного электрического сопротивления в Imja Tsho, в Непале, показывает на отсутствие высоких значений удельного сопротивления в пределах морены. Зоны массивных тел в ВЧР видны как вкрапления высокого удельного сопротивления противоположно большому количеству проводящей морены.

Оценка опасности

Приблизительно за десятилетие, было много изучено о развитии опасности ледниковых прорывов и методах оценки опасности в различных масштабах. Были получены захватывающие новые данные, используя оптическое дистанционное зондирование (Кааб и др. 2003; Quincey и др. 2005), чтобы облегчить картирование ледников и ледниковых озер по всем дренажным путям и синтетической апертуре по дистанционному сбору данных радаром для измерения значений поверхностного движения ледников покрытых наносной породой; потенциально опасные ледниковые озера обычно развиваются на неподвижных ровных частях ледников (Рейнольдс, 2000). Этот метод дает распознавание тех участков, на которых должны быть проведены наземные исследования определенным типом наземных съемок, включая геофизические исследования. Например, рис 3 показывает полученное плоско-усиленное многоспектральное изображение SPOT5, наложенное на цифровую модель высот развивающегося ледникового озера в Manlung Chhu в Тибете (Китай). Результаты подобного типа могут быть соединены на компьютере, в различной перспективе, чтобы помочь идентифицировать потенциальные места работ для получения геофизических и других разрезов, чтобы получить важную информацию и сделать полную оценку опасности. В 2003, в результате трехлетнего финансирования правительством Великобритании научно-исследовательской работы, было издано первое руководство с принципами оценки опасностей ледников, (RGSL, 2003). Они включают часть с использованием геофизических методов в оценке опасности ледников (Приложение формата A4) и доступны в Интернете (в виде PDFs от www.bgs.ac.uk/dfid-kar-geoscience/database/reports/colour/ADD048_COL.pdf или от www.geologyuk.com).

Исчерпывающее наземное исследование должно включать набор съемок, от элементарной топографии, геоморфологии, инженерной геологии, и ледниковой геологии до структурной картографии гляциологами места формирования ледника. Все это эффективно используется, чтобы отследить рельеф поверхности и установить происхождение процессов, которые могут или, возможно, не могут воздействовать на систему ледника и ледникового озера. Интерпретацией этих данных определяется внутренняя структура дамб морены в целях рассмотрения геотехнической стабильности морены и ее взаимодействия с озером или другими водными объектами. Что кардинально отсутствует, в большинстве случаев – объемное изображение, отображение того, что - внутри, а не только гипотезы об этом. Это может сделать оценку опасности правильной или неправильной. Ошибки, сделанные на данном этапе могут иметь огромные последствия для многих жизней, как случилось в трагическом прошлом. Поэтому должным образом выполненные и проинтерпретированные геофизические съемки людьми, опытными в гляциологии, могут играть критическую роль в оценке опасностей ледников.

Роль геофизики

Геофизические методы использовались как для чистых ледников, так и поверхностей ледников много лет. Однако, проведение соответствующих геофизических исследований по покрытым обломками породы ледникам и большим моренам, которые могли бы содержать захороненный лед, - в целом различные вычислительные и научные проблемы. Ранние попытки были сделаны в Альпах и Кордильерах Бланка в Перу в 1960-ых и 1970-ых (например, Rdtlisberger, 1967; Lliboutry, 1977). Томография удельного электрического сопротивления в горах Гималаях и низкочастотный радар впервые были использованы очень эффективно в 1996 в Thulagi, Районе Manaslu,

Наука об окружающей среде и инженерная наука

first break том 24, Август 2006



Рис 5 Фотография работы с георадаром, полученная по ледяному шлейфу перед активным айсбергообразующим ледником Trakarding. Озеро Tsho Rolpa справа от этой картины.

Районе Manaslu, Непал (Delisle и др. 2003; Hanisch и Pant и Рейнольдс, 2000). Эта работа привела к первому промышленному использованию коммерческой радарной системы (Геофизические исследования Mala система RAMAC) в Непале в Tsho Rolpa, в 1997 с дальнейшей томографией удельного электрического сопротивления (Rana и др. 2000; Richardson и Рейнольдс, 2000).

Геофизические работы над боковыми и конечными моренами Tsho Rolpa, как полагали, были важны для полной оценки опасности и для исправления стратегии работ на озере. Морена, запруживающая озеро, приблизительно 150 м высотой; в 1994 был маленький естественный выход в середине конечной морены, но в другом месте надводный борт был только 1 м., и поверхность озера была буквально у гребня дамбы. Протекание дамбы происходило приблизительно от одной трети пути на отдаленной от середины стороне морены, и была морфологическая очевидность присутствия захороненного инертного льда в пределах северо-западной части морены. Ледник Trakarding, обрывающийся в восточном окончании озера на отдалении приблизительно 3 км активно образовывал большие

блоки льда, производящие небольшие волны, достигающие дамбы морены. Несколько тысяч человек живут в маленьких деревнях по нисходящему течению ледника, и Khimte II НЕР – влияет на 86-километровый нисходящий участок.

В 1992, было очевидно, что надо что-то предпринять, чтобы срочно восстановить это озеро. В 1995 были предприняты некоторые эксперименты, используя откачку, впервые в Гималаях. В то время как они работали чрезвычайно эффективно, но они не могли достаточно опустить уровень озера в нужный интервал времени. То есть, финансирование было найдено, и в 1997 году была начата работа по проектированию системы восстановления, которая могла убрать необходимое количество воды достаточно быстро, чтобы обеспечить уменьшение материального риска. Часть этой работы должна была ответить на вопрос где в пределах морены расположен захороненный лед. Выполнение глубинных работ в дамбе только, чтобы показать захороненный лед, вероятно, вызвало бы разрушение дамбы морены, и этого нужно было избежать любой ценой.

К концу этих работ, георадар (GPR) использовался для изучения морены, определения структуры строения дамбы, чтобы помочь в геотехнической оценке ее стабильности, так же как продемонстрировать, что некоторые области были свободными от захороненного льда. В меньшей степени использовалась томография удельного электрического сопротивления, и оба метода, особенно при совместном использовании, обеспечили очень ясное представление для отсутствия и присутствия льда в каждом участке (Рис 4). Интерпретация удельного сопротивления использовалось также, чтобы проверить возможное просачивание через морену, на более низком уровне. Другим направлением исследований был язык ледника, падающий в озеро – был ли он на плаву, или был на основании? Если рассмотреть первый вариант, то внезапное падение уровня озера, возможно, имело бы катастрофические последствия, ледяной язык должен разрушиться на большие блоки весом в многие тысячи тонн – и следующая за этим волна разрушила бы любые восстановительные усилия и разрушило бы дамбу.

Таким образом, GPR использовался на обнаженном ледяном перекрытии на барьере языка ледника, чтобы попробовать ответить на этот вопрос (Рис 5). В дальнейшем было проведено дополнительное поверхностное геологическое картирование непосредственно всего ледника и его окрестностей. Это, вместе с детальным структурным гляциологическим анализом ледника,



Рис 6 Сформировавшийся открытый отрезанный канал и иллюзные ворота в Tsho Rolpa, Непале, после успешного понижения уровня озера на 3.5 м. в июле 2000. Часть морены в правой верхней стороне картинки разбурилась с отбором керна с инертным ледниковым льдом.

Наука об окружающей среде и инженерная наука

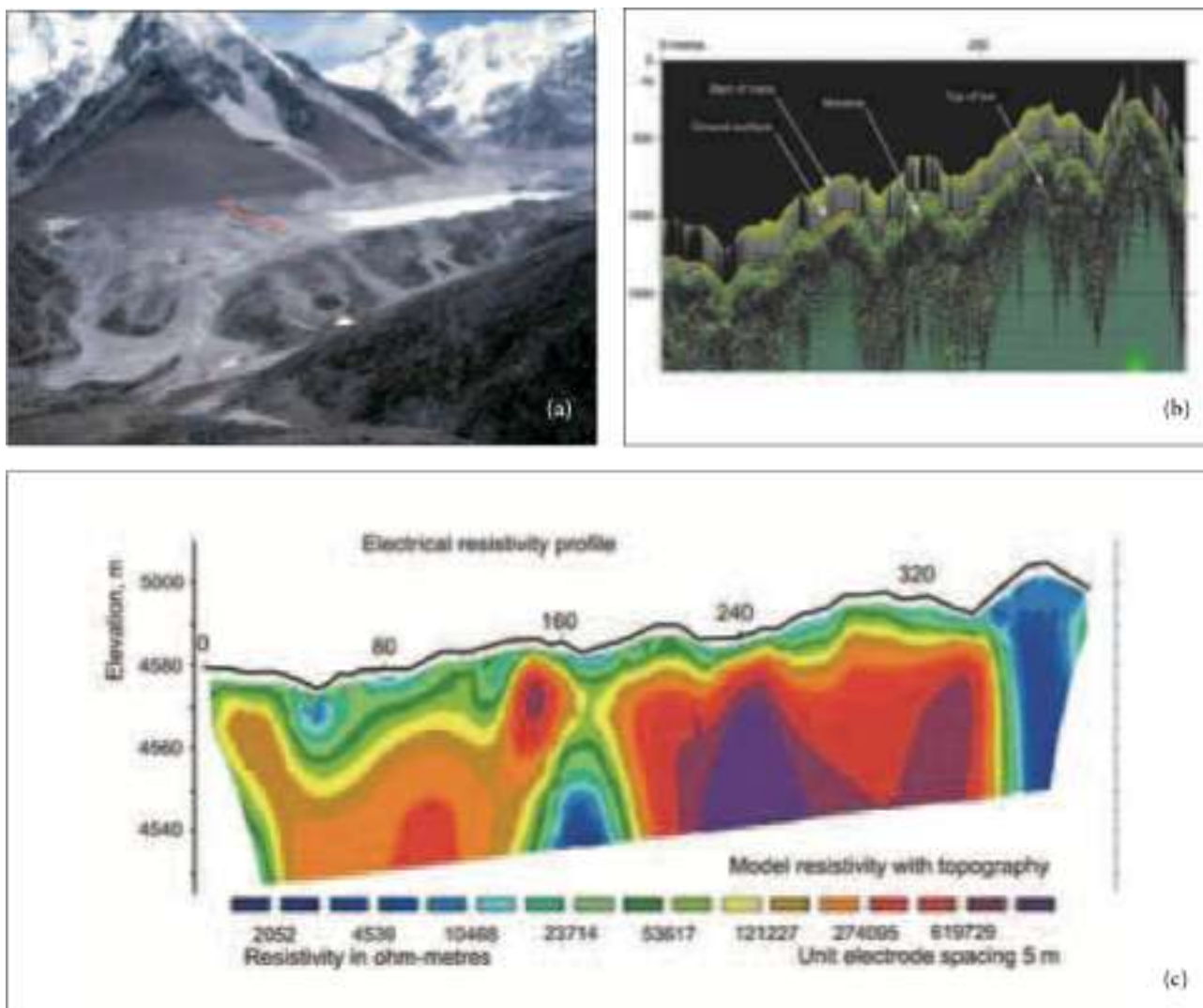


Рис 7 (a) Imja Tsho и ее покрытая обломками пород инертная ледяная область и конечные и боковые морены, с (b) GPR и (c) удельное электрическое сопротивление вкост линии профиля, показанной красным (a). Области очень высокого удельного сопротивления указывают, где присутствует захороненный лед.

Как прямое следствие использования геофизических методов в конечной морене, что, как полагали, было определение самого подходящего места открытого канала. Работа началась в 1999 году, и место канала и шлюзовых ворот были установлены успешно и уровень озера, был опущен без проблем на 3.5 м. в июле 2000 (Рис 6). GPR и данные удельного сопротивления показали захороненный лед толщиной 20 м в северо-западной части конечной морены и процесс активной термокарстовой эрозии, и опускание в 1997 году, по рекомендациям специалистов-геофизиков, уровень озера должен быть опущен в общей сложности на 20 м.; первые 3.5 м. были достигнуты, но финансирование прекратилось и должно быть найдено для остающейся части работы. Тем временем захороненный лед в дамбе продолжает таять...

Детальные геофизические исследования были также проведены в Imja Tsho, рядом с горой Эверест в Непале. Они были выполнены для оценки опасности в этом озере и для проверки эффективности этих методов (Рис 7). Результаты исследований указали, что это озеро, в то время большое, в настоящее время хорошо ограничивается мореной и не представляет серьезной опасности в ближайшее время.

Другие геофизические методы были применены на других ледниковых озерах (сейсмические методы МОВ, МПВ, микро-гравика, и электромагнитное профилирование). Ни один из них не был достаточно информативным и не отличался хорошим качеством, чтобы оправдать финансовые и трудоемкие затраты. Есть огромные трудности в размещении сейсмоприемников на богатой валунами морене и в получении достаточного источника энергии, чтобы достигнуть необходимых глубин. Колебание топографических значений вкост холмистых морен (до ± 20 м. весьма обычны)

Наука об окружающей среде и инженерная наука

first break том 24, Август 2006

и неоднородность материалов заставляет гравиметрическую составляющую также замедляться, и очень трудно получить реальные данные аномалии Буге. Эти методы также слишком подвержены физическим особенностям местности и также испытывают недостаток в разрешении, чтобы использоваться в среде с низкой удельной проводимостью. Ясно, что лучшие и самые практические методы вкост покрытых обломками породам ледников и морен являются томография удельного электрического сопротивления и георадар. Метод потенциала самопроизвольной поляризации также применялся для использования при картировании просачиваний через естественные дамбы.

Заключение

Были продемонстрированы геофизические методы, особенно георадар и томография удельного электрического сопротивления, как методы эффективного картирования захороненного льда в пределах конечных морен, так же как возможных областей системы просачивания через дамбы. Также для получения реальной трехмерной информации для строгой оценки ледниковых опасностей. К этому времени геофизические методы достигли совершенства и теперь рекомендуются как неотъемлемая часть наземной части поисково-разведочных работ и картографии. Мало того, что это - информация, полезная для оценки опасностей ледников, это также является обеспечением информационной основы для проекта безопасного и эффективного текущего ремонта. В результате применения методов оценки ледниковой опасности и их устранения, была неизмеримо улучшена безопасность тысячи людей и значительно уменьшены риски. Роль соответствующих геофизических методов хорошо подтверждена при оценке ледниковых опасностей и в последующем проекте их устранения.

Благодарности

Автор признает ценный вклад в эту работу Доктора Шона Ричардсона, прежде RGSL, Доктора Серендры, Университет Tribhuvan, Непал, и коллег в Отделе Гидрологии и Метеорологии, Правительство Его Величества Непала, Катманду. Спасибо также коллегам из Центра Гляциологии, Университета Уэльса, Аберистута, и Glaciologia у Hydrologia, INRENA, Huaraz, Перу, за длительное сотрудничество в области оценки опасности ледников и дистанционном зондировании.

Ссылки

Delisle, G., Reynolds, J.M., Hanisch, J., Pokhrel, A.P., and Pant, S. [2003] Lake Thulagi/Nepal: rapid landscape evolution in reaction to climate change. (*Z. Geomorph. N.F.*) *Annals of Geomorphology*, **130**, 1-9.

Hanisch, J., Delisle, G., Pokhrel, A.P., Dixit, A.M., Reynolds, J.M., and Grabs, W.E. [1998] The Thulagi glacier lake, Manaslu Himal, Nepal - Hazard assessment of a potential outburst. *Proceedings of the Eighth International IAEG*

Congress, 21-25 September 1998, Vancouver, Canada, 2209-2215.

Hubbard, B., Heald, A., Reynolds, J.M., Quincey, D., Richardson, S.D., Zapata, M., Santillan, N., and Hambrey, M.J. [2005] Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru. *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**, 1251-1264.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). [2001] *Third assessment report*. Working Group I. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Lliboutry, L. [1977] Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. II. Movement of covered glacier embedded within a rock glacier. *Journal of Glaciology*, **18**, 79, 255-273.

Kaab, A., Wessels, R.L., Haeberli, W., Huggel, C., Kargel, J.S., and Khalsa, S.J.S. [2003] Rapid ASTER imaging facilitates timely assessment of glacier hazards and disasters. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, **84**, 117-121.

Pant, S.R. and Reynolds, J.M. [2000] Application of electrical imaging techniques for the investigation of natural dams: an example from the Thulagi Glacier Lake, Nepal. *Journal of the Nepal Geological Society*, **22**, 211-218.

Quincey, D.J., Lucas, R.M., Richardson, S.D., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., and Reynolds, J.M. [2005] Optical remote sensing techniques in high-mountain environments: application to glacial hazards. *Progress in Physical Geography*, **29**, 4, 475-505.

Rana, B., Shrestha, A.B., Reynolds, J.M., Aryal, R., Pokhrel, A.P., and Budhathoki, K.P. [2000] Hazard assessment of the Tsho Rolpa Glacier Lake and ongoing remediation measures. *Journal of the Nepal Geological Society*, **22**, 563-570.

Reynolds Geo-Sciences Ltd (RGSL). [2003] *Development of glacial hazard and risk management protocols in rural environments - Guidelines for the management of glacial hazards and risks*. RGSL, Mold, UK.

Reynolds, J.M. [1992] The identification and mitigation of glacier-related hazards: examples from the Cordillera Blanca, Peru. In: McCall, G.J.H., Laming, D.C.J. and Scott, S. (Eds), *Geohazards*, London, Chapman & Hall, 143-157.

Reynolds, J.M. [1998] Managing the risks of glacial flooding at hydro plants. *Hydro Review Worldwide*, **6**, 2, 18-22.

Reynolds, J.M. [2000] On the formation of supraglacial lakes on debris-covered glaciers. In: Nakawo, M., Raymond, C.F. and Fountain, A. (Eds.), *Debris-Covered Glaciers*, Proceedings of the Seattle Workshop, USA, September 2000, IAHS Publication 264, 153-161.

Richardson, S.D. and Reynolds, J.M. [2000] An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, **65/66**, 31-47.

Rothlisberger, H. [1967] Electrical resistivity measurements and soundings on glaciers: introductory remarks. *Journal of Glaciology*, **6**, 47, 599-606.