

## Методика научных исследований

УДК 551.4.012(99)

© 2004 г. А.Н. ЛАСТОЧКИН, С.В. ПОПОВ

МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ЛИНИЙ  
В ПОДЛЕДНО-ПОДВОДНОМ РЕЛЬЕФЕ АНТАРКТИКИ<sup>1</sup>

## Общие представления о структуре подледно-подводной поверхности

Ниже излагаются первые результаты начального этапа всесторонних исследований подледно-подводного рельефа (ППР) Антарктики, которые проведены на основе морфодинамической концепции, направляющей геоморфологию на познание своего объекта от его формы – рельефа подледно-подводной поверхности (ППП) к содержанию – создавшим этот рельеф и зависимым от него рельефообразующим процессам [1, 2]. Историко-генетическое картографирование и изучение рельефа и рельефообразующих процессов без предварительного организованного (системного) познания морфологии ППП в условиях отсутствия геологических материалов на большей части Антарктики (99,7% ее площади) вряд ли будут успешными. Изучение ППР Антарктики и других областей современного покровного оледенения только началось в связи с поступлением в последнее время огромного по объему материала радиолокационного профилирования (РЛП). При этом формируется новая дисциплина – *субгляциальная геоморфология*. Она призвана получать собственный материал о морфологии (структуре и элементах) ППП, проводить ее динамическую (кинематическую, функциональную, генетическую и др.) интерпретацию и лишь затем на равных соотносить полученные ею результаты и выводы о динамике земной коры и ледникового покрова с материалами региональной геофизики (магнитометрии, гравиметрии и сейсмики) и гляциологии, а также с фрагментарными данными по геологии прибрежных районов.

Первичным в геоморфологическом изучении Антарктики следует считать *структурный анализ ППП* – выявление и фиксацию ее строения с последующим динамическим истолкованием структуры этой поверхности. Используемое понятие о структуре имеет отношение к строению не земной коры (с которым чаще всего в геоморфологии ассоциируется этот термин), а земной поверхности, в нашем случае – ППП. Ее структура проявляется во взаимных пространственных соотношениях ее различных элементарных частей или элементов, выделенных в соответствии со всеми известными в системных исследованиях принципами элементности [1, 2]. Таким образом, субгляциальная геоморфология основывается, с одной стороны, на принятом в геоморфологии и прежде всего в аналитическом картографировании представлении о рельефе как совокупности элементов, а с другой – на не менее важном его определении [1, 2], как структуры земной поверхности. Второй аспект дефиниции рельефа придал данному понятию системное звучание (ППР есть состав и структура ППП) и определил своеобразный алгоритм геоморфологических исследований в Антарктике, в котором *на первом месте выступает познание структуры ППП* [1, 2].

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 03-05-64198).

Это место обеспечивается ей тем, что она может анализироваться в первую очередь и вне зависимости от знания об элементах и состоящих из них форм ППП, в то время как последние нельзя выделить без установления видов связности их друг с другом (причленения, соединения, последовательная, параллельная связи по латерали и вертикали и др.), а также трассирования детерминирующих, доминирующих и ограничивающих их структурных линий (СЛ). Не случайно структурный анализ во многих отраслях естествознания представлен самостоятельным методическим направлением, не (или почти не) нуждающемся в каких-либо априорных методических сведениях о связанных в изучаемую структуру ингредиентах объекта.

Таким образом, *структурный анализ ППП* предусматривает отражение ее строения в виде решетки или сети, максимально абстрагированной от вписанных в нее элементов. Он включает в себя следующие последовательные процедуры и построения: а) фиксацию структуры на первичной структурной модели – карте СЛ; б) преобразование данной карты в карту структурной координатной сети, на которой выделяются разные категории организации ППП в виде симметрии рисунков этой сети; в) определение искажений или диссимметрии выделенных рисунков по сравнению с их идеальными аналогами [2]; г) динамическую интерпретацию симметрии и диссимметрии рисунков структурной координатной сети в отношении пликативной, инъективной и дизъюнктивной форм неотектогенеза, гляциотектонических и литодинамических процессов на суше, шельфе и континентальном склоне. В настоящей работе речь идет о методике и результатах проведения только первой процедуры – построения карты СЛ, на которой основываются все последующие исследования, проводимые в соответствии с морфодинамической концепцией субгляциальной геоморфологии.

Создание максимально подробной карты СЛ требуется и для устранения тех недостатков, которые связаны с современной методикой построения карт гипсобатиметрического положения ППП. Она предусматривает использование различных, в основном заимствованных в региональной геофизике, способов осреднения этой поверхности. Данная процедура вступает в серьезное противоречие с одним из важнейших требований к картам такого рода в русской гипсометрической школе – их географическому правдоподобию [3]. Последнее, правда, трудно совмещается со стремлением к повышению их точности, но необходимо для обзорных и мелкомасштабных гипсометрических (батиметрических) карт, требование к точности которых в связи с их предполагаемым применением (для формирования общих представлений о рельефе крупных регионов и использования в образовательном процессе) отступает на второй план. К сожалению, как на наиболее совершенной и полной международной карте гипсобатиметрического положения всей Антарктики [4], так и на карте такого же содержания, построенной на регион желоба Ламберта [5], требование географического подобия выполнено не было. В результате у неискушенного потребителя данной картографической продукции поневоле могло возникнуть представление об отсутствии в ППР долинной сети, что полностью противоречит географической реальности. Данная сеть должна была бы отражаться хотя и искусственными, но обычно используемыми для соблюдения географического подобия "затяжками" горизонталей вдоль тальвегов, как это имеет место на многих гипсометрических и общегеографических картах суши. Наши более детальные исследования ППР желоба Ламберта и его обрамления (по сравнению с предыдущей публикацией [5]) показали повсеместное наличие в пределах данного региона долинной сети, часто густой и довольно сложной по своему строению. Способствовали ее выявлению использование более крупномасштабных исходных материалов и дальнейшее развитие методики выделения СЛ, результаты которых изложены в настоящей статье.

Структурные линии выступают в роли линий связи между другими (площадными, точечными) элементами ППП. В геоморфологии, гидрографии, топографии выделяются гребневые ( $L_1$ ), килевые ( $L_2$ ) линии, выпуклые ( $L_3$ ) и вогнутые ( $L_6$ ) перегибы профиля. Это наиболее общее деление линейных элементов не учитывает особенностей проявления названных линий в профиле и в плане. Их полная группа в морфоло-

гической системе составляет 20 разновидностей [6]. Однако на данном этапе исследований и последующего решения практических задач можно считать достаточным ограничение структурного анализа изучением взаимного положения четырех названных и символически обозначенных категорий СЛ. Их выделение осуществляется на визуальном и автоматизированном уровнях.

### Визуальное выделение структурных линий на радиолокационных профилях и гипсометрических картах

Так как радиолокационное профилирование выступает в качестве основного источника информации о ППП и ее рельефе, методика выделения на каждом профиле проекций  $L_1, L_2, L_5, L_6$  и их трассирования в плане – важнейшая составляющая методического аппарата субгляциальной геоморфологии. В общем плане, применительно к любому рельефу, она предложена в работе [2]. При этом профиль рассматривается в качестве графика функции  $H(x)$  и сопровождается графиками двух первых производных от нее. По экстремальным и нулевым значениям функции и производных выделяются отличительные точки (ОТ) – проекции на профиль СЛ [2, 7]. По отношению к рельефу океанического дна данная методика была использована при построении аналитической геоморфологической карты, на которой СЛ выполняют роль границ площадных элементов [8, 9].

Учитывая обширный объем исходных данных для выделения ОТ, а также уже осуществленный перевод с профилей информации о высотах (глубинах) ППП в электронную форму, для проведения СЛ следует использовать изолинейные карты гипсометрического положения ППП. Методика трассирования линейных элементов на изолинейных картах в целом рассмотрена нами ранее [2, 7]. Применительно к рельефу шельфа и континентального склона она подробно описана в официально принятых методических рекомендациях Министерством природопользования РФ [10] и здесь не нуждается в повторном изложении.

Следует добавить, что лучшей основой для проведения СЛ (особенно на больших площадях и в условиях Антарктики) являются карты гипсометрического положения ППП, составленные в равноугольной проекции Меркатора. Трассирование по ним СЛ осуществляется более уверенно, так как углы изменения их направления, сочленений и пересечений адекватны тем углам, которые имеют место в природе. Данная картографическая проекция, по вышеуказанным причинам, позволяет более четко определить вид симметрии (и диссимметрии), которому подчиняются рисунки, в дальнейшем составляемой на основе карты гребневых и килевых линий, структурно-координатной сети [2, 7, 9]. При этом предусматривается обязательный последующий перевод карты выделенных СЛ в более привычную полярную или коническую проекцию, в которой составляется итоговая геоморфологическая карта.

В результате использования современной карты гипсометрического положения ППП Антарктики м-ба 1 : 10000000 [4] на визуальном уровне составлена карта СЛ  $L_1$  и  $L_2$  Антарктики (рис. 1). На ней четко прослеживаются закономерности взаимного соотношения линейных и вытянутых положительных и отрицательных форм ППП (хребтов, отрогов, прогибов, увалов, ложбин стока, подводных долин и каньонов и др.), осевыми линиями которых являются СЛ  $L_1$  и  $L_2$ , а границами – СЛ  $L_5$  и  $L_6$ . К таким закономерностям относятся:

а) конгруэнтность (взаимная совместимость при наложении или, проще, параллельность) и перпендикулярность вытянутых и линейных форм и/или отражающих их линий;

б) сочленения последних под разными, в том числе прямыми углами;

в) наличие трансантарктических (диаметральных), радиальных и концентрических наиболее протяженных орографических образований и отражающих их (оси, границы) СЛ относительно Южного полюса и всего материка;

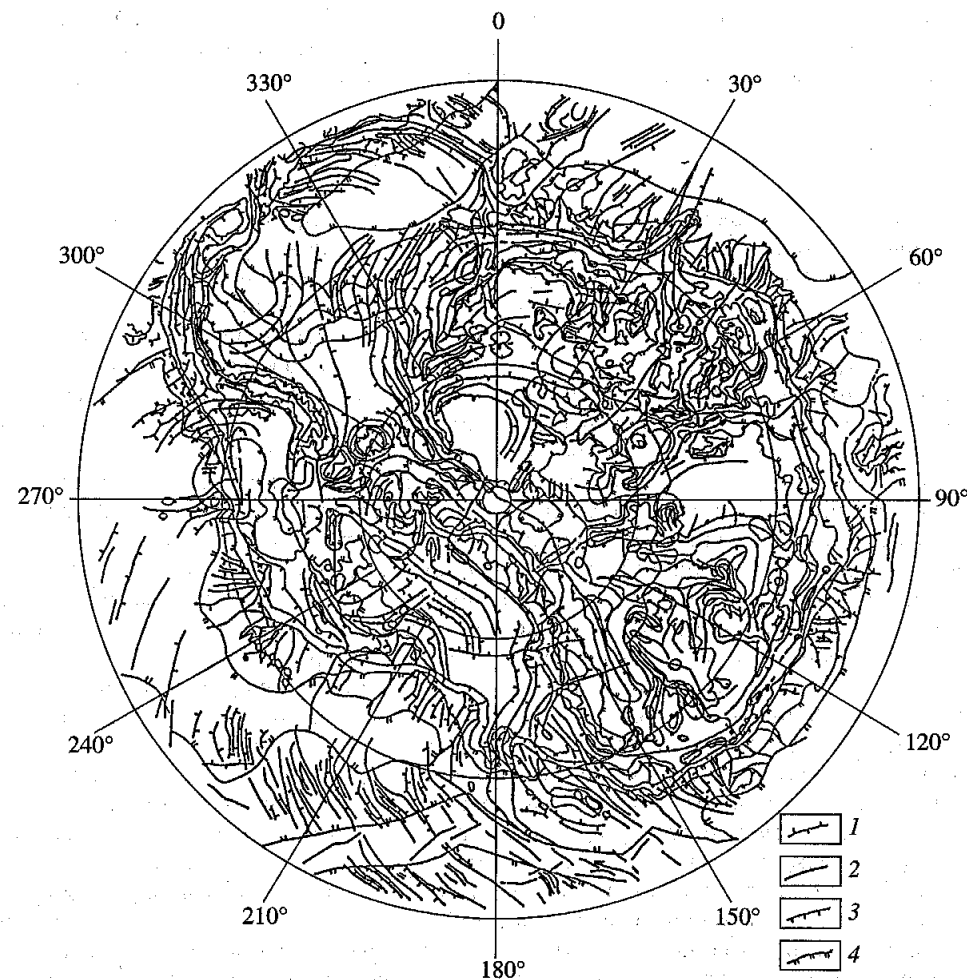


Рис. 1. Карта структурных линий в подводно-подледном рельефе Антарктики  
Структурные линии: 1 – гребневые, 2 – килевые, 3 – выпуклых перегибов, 4 – вогнутых перегибов

г) резкие согласованные смены направлений серий линейных элементов, вероятно связанные с горизонтальными смещениями по сдвигам;

д) наличие регионов с принципиально различающимися ориентировкой и интенсивностью (отношением относительных высот и глубин к площади) линейных и вытянутых форм, ограниченных СЛ;

е) трассирование ряда линий выпуклых и вогнутых перегибов, которое позволило по-новому определить орографический план ряда регионов и оконтурить ранее не выделяемые крупные формы ППП (к последним прежде всего относится диаметрально СЛ  $L_2$ , проходящая субпараллельно Трансантарктическому хребту и являющаяся осью прогиба, проходящего строго по Южному полюсу Земли);

ж) прослеживание "дальних или транзитных связей", фиксируемых СЛ всех видов не только между формами ППП, но и между их (пока) не вычлененными частями.

На рис. 1 показаны СЛ четырех названных выше типов. По сути дела, эта карта включает в себя все виды неполно определенных геоморфологических границ. Она является основой для последующего составления геоморфологической аналитической карты рельефа на системно-морфологическом принципе, на которой должны

быть представлены кроме СЛ другие элементы ППП – элементарные поверхности и характерные точки. Все они выступают в разном качестве доминантных, детерминантных и ограничивающих элементов, составляющих орографические формы или геоморфосистемы.

#### Автоматизированное выделение структурных линий

Существуют два подхода к автоматизированному выделению СЛ: двумерное и трехмерное моделирование. В первом случае положение ОТ разных категорий определяется на отдельных профилях, которые затем коррелируются в плане и соединяются в структурные линии. Во втором случае мы имеем дело с математической моделью ППП, составленной на основе грида (grid) – регулярной сети или прямоугольной матрицы с постоянными шагами между узлами по каждой координате. Перевод всей гипсобатиметрической информации (материалов РЛП, сейсморазведки, гидрографического промера с разными междупрофильными и междугалсовыми расстояниями) на эту основу сопровождается, с одной стороны, осреднением и интерполяцией исходных данных, в результате чего неизбежны их потери и искажения [9]. С другой стороны, при этой процедуре осуществляется полное плановое согласование разнородной профильной информации о высотах и глубинах ППП, что облегчает последующее выделение СЛ на изолинейной мелкомасштабной карте. Это особенно важно для тех условий, когда выбранные маршруты носителя (самолета с радиолокационной аппаратурой) резко не согласуются с поперечным направлением (в крест простираения) по отношению к картируемым формам и элементам ППП. В связи с тем, что профиль обычно получен посредством цифровой регистрации и является совокупностью не плавных, а ломаных линий, при анализе первой (для фиксации СЛ  $L_1$  и  $L_2$ ) и тем более второй и третьей (для фиксации СЛ  $L_5$  и  $L_6$ ) производных неизбежно появление на сопровождающих профиль графиках первой и второй производных большого количества ложных точек. Таким образом, либо придется работать с отдельными профилями (а их количество иногда измеряется сотнями), перед этим доведя их посредством фильтраций или иных нелинейных математических преобразований, до возможности использования аппарата дифференцирования с последующим выделением ОТ и их соединения на аналитической карте, либо иметь дело с моделью ППП на основе грида, которая уже является продуктом сглаживания и прочих нелинейных преобразований, и решать задачу нахождения положения СЛ в трехмерном пространстве.

**Нахождение отличительных точек на двумерной модели.** При нахождении ОТ на двумерной модели должно быть осуществлено сглаживание реальных маршрутных данных до возможности применения численного дифференцирования. Наиболее простым и распространенным методом является фильтрация по  $N$  точкам:

$$\bar{z}_0 = \sum_{i=0}^N \rho(i)(z_i + z_{-i}), \quad (1)$$

где  $\rho$  – некоторый весовой коэффициент. Частным случаем (1) является треугольная фильтрация:

$$\bar{z}_0 = \frac{(N+1)z_0 + \sum_{i=1}^N (N+1-i)(z_i + z_{-i})}{N+1 + \sum_{i=1}^N (N+1-i)} \quad (2)$$

Ее применение в некоторых случаях позволяет достигать необходимых результатов. Однако, как показывает опыт, более перспективно использование сглаживаю-

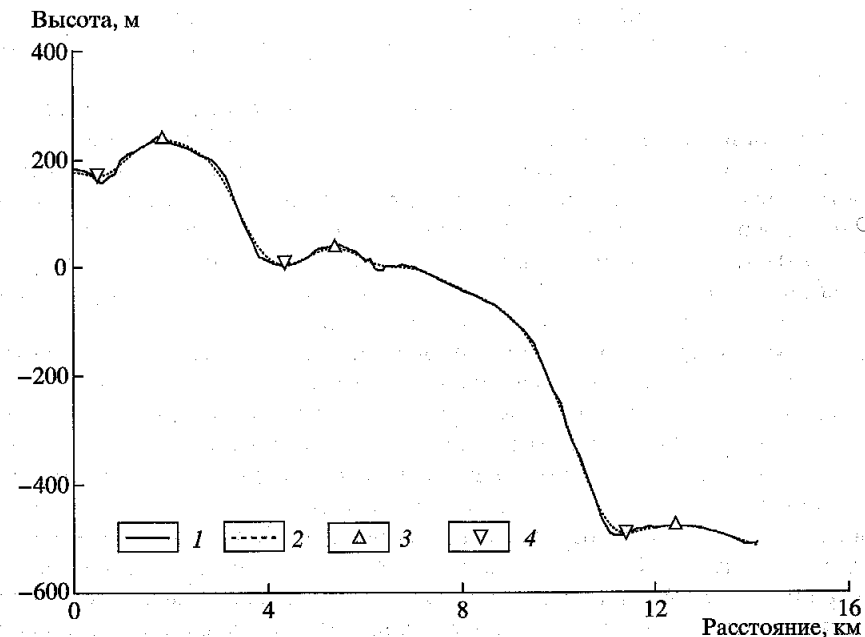


Рис. 2. Результат обработки данных радиолокационного профилирования сглаживающим сплайном 1 – реальные измерения, 2 – результат сглаживания, 3 – гребни (точки  $O_1$ ), 4 – тальвеги (точки  $O_2$ )

щего сплайна, когда реальные данные аппроксимируются плавной кривой. Однако даже в этом случае нахождение ОТ затруднено. Численное дифференцирование сглаженных данных позволяет построить плавную кривую первой производной (уклонов ППП), по которой возможно выделение ОТ  $O_1$  и  $O_2$  – проекций на профиль СЛ  $L_1$ ,  $L_2$ , а также  $O_3$  и  $O_4$  – проекций линий максимальных ( $L_3$ ) и минимальных ( $L_4$ ) уклонов [2]. Последние в настоящее время не используются в геоморфологическом картографировании [6, 9, 10]. Однако при автоматизированном профилировании эти элементы оказывают определенную помощь для выделения субвертикальных и субгоризонтальных элементарных поверхностей. Вторая производная, полученная в результате численного дифференцирования первой производной, уже перестает быть плавной кривой. В данном случае сказывается дискретность исходных материалов и особенности повторного дифференцирования.

Наиболее удачным выходом из положения следует считать сглаживание второй производной посредством отсечения высоких гармоник, ответственных за шаг дискретизации, что достигается использованием прямого и обратного преобразования Фурье.

Таким образом, ОТ  $O_1$  и  $O_2$ , являющиеся проекциями гребней и тальвегов на плоскость профиля соответственно, целесообразно выявлять непосредственно по сглаженным исходным данным [11]. Как видно из рис. 2, их выделение выполняется успешно. Моделирование осуществлялось по одному из профилей, полученных в районе российской внутриконтинентальной станции "Восток" в течение летнего полевого сезона 46 РАЭ (2001–2002) [12, 13].

Положение особых точек  $O_5$  и  $O_6$  (бровок и тыловых швов соответственно) целесообразно находить по сглаженной посредством преобразований Фурье второй производной от высот (глубин). Сглаживание осуществлялось по 180 гармоникам.

Реальное положение точек  $O_5$  и  $O_6$  в рамках существующей модели определяется посредством отсечения "лишних" точек. Другой путь заключается в уменьшении

числа гармоник при преобразовании Фурье. При их сокращении некоторые точки могут быть потеряны. Оптимальное количество гармоник зависит от конкретного материала.

**Нахождение отличительных точек для трехмерной модели посредством формирования псевдопрофилей.** Нахождение ОТ по составленной на основе грида трехмерной модели более перспективно. В пределах ее формируются фиктивные профили, ориентированные особым образом, по которым осуществлялся поиск ОТ описанным выше способом. Поиск точек  $O_5$  и  $O_6$  упрощен – проводится без сглаживания второй производной ввиду того, что модель ППП уже сама по себе результат существенного сглаживания данных. Суть предлагаемого метода состоит в ориентировании фиктивных профилей таким образом, чтобы они проходили именно вкост простирания картируемых форм ППП: долин и прочих линейных и вытянутых (положительных и отрицательных) образований разного генезиса, а также ледорадельных пространств ("ледоразделов"). В противном случае неизбежно появление фиктивных ОТ.

Как практически сформировать поперечные фиктивные профили? Как известно, векторы максимальных уклонов направлены перпендикулярно изолиниям, т.е. вкост простирания форм ППП. Если покрыть исследуемую территорию сетью фиктивных маршрутов с некоторым шагом, ориентированных по направлению максимального уклона ППП в центральной точке, а затем проанализировать полученные профили на предмет наличия в них ОТ, то поставленная задача будет решена. Недостатком метода является некоторая неопределенность в плане выполнения построений, поскольку для нахождения ОТ необходимо иметь три узла грида. Результатом построений является карта отличительных точек, которые следует соединить между собой при трассировании гребневых и килевых линейных элементов.

На рис. 3 приведена карта ОТ  $O_1$  и  $O_2$  на район грабена Ламберта (Восточная Антарктида), построенная по рассмотренному выше алгоритму.

**Нахождение отличительных точек для трехмерной модели посредством анализа векторных линий.** Еще один недостаток только что описанной методики – необходимость соединения рассчитанных ОТ между собой при проведении СЛ, которое иногда бывает неоднозначным. От него избавлен другой предлагаемый нами алгоритм. Он основан на использованной в геоморфологии А.С. Девдариани [14] идее кинематического описания движения (замещения) земной поверхности методом прослеживания материальной точки (метод Лангранжа), "выпущенной" из каждого узла грида. Ее движение по ППП регулируется двумя правилами: во-первых, она не может подниматься вверх по поверхности, какой бы скоростью не обладала (мы запрещаем закон инерции), и, во-вторых, – она двигается по пути максимальных уклонов, т.е. по векторным линиям или линиям тока, отражающим реальные и потенциально возможные трассы перемещения нисходящего вещества по ППП. В результате получается карта векторных линий, пример которой приведен на рис. 4.

Карта векторных линий имеет в геоморфологии большое самостоятельное значение [2, 7, 9], отражая в плане направление перемещения любого вида вещества на земной поверхности, его концентрацию или, наоборот, рассеивание на вогнутых и выпуклых элементарных поверхностях и их совокупностях. Такая роль данного построения привела к предложению включить линии тока в условные обозначения – легенду геоморфологической аналитической карты, составляемой по системно-морфологическому принципу [9, 10] для отражения формы площадных элементов в плане и в поперечном профиле.

На карте векторных линий СЛ  $L_2$  проявляется в виде зон максимального сгущения линий тока, а СЛ  $L_1$  – пограничных зон их разряжения (водо- или ледоразделов), подобных проборам на тщательно выполненной прическе. Степень сгущения или насыщенности векторными линиями отражает линейную плотность нисходящих потоков по ППП и порядок выделяемых тальвегов и долин.

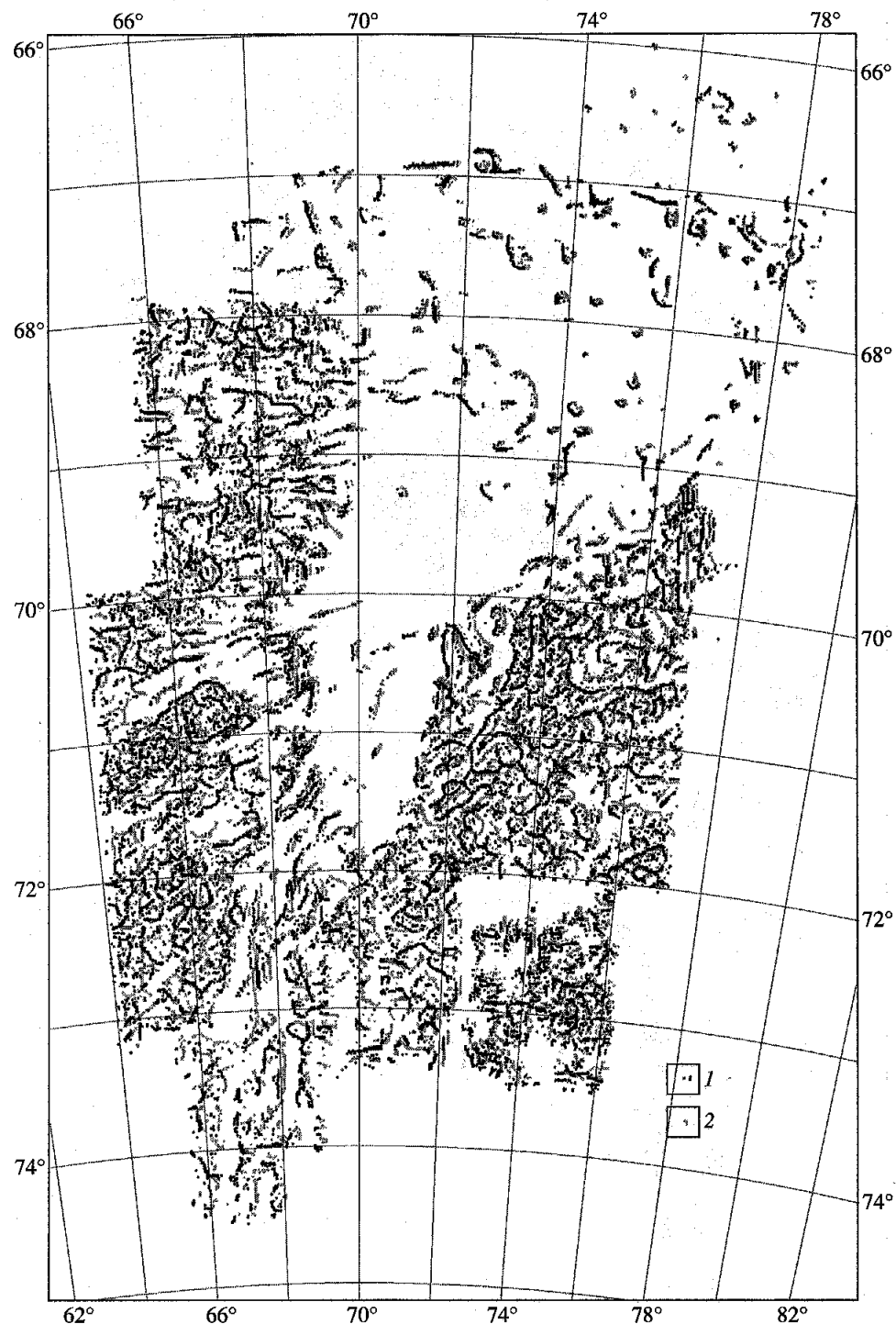


Рис. 3. Положение отличительных точек  $L_1$  и  $L_2$ , построенных по методике формирования псевдопрофилей на район грабена Ламберта (Восточная Антарктика)  
Отличительные точки: 1 –  $L_1$ , 2 –  $L_2$



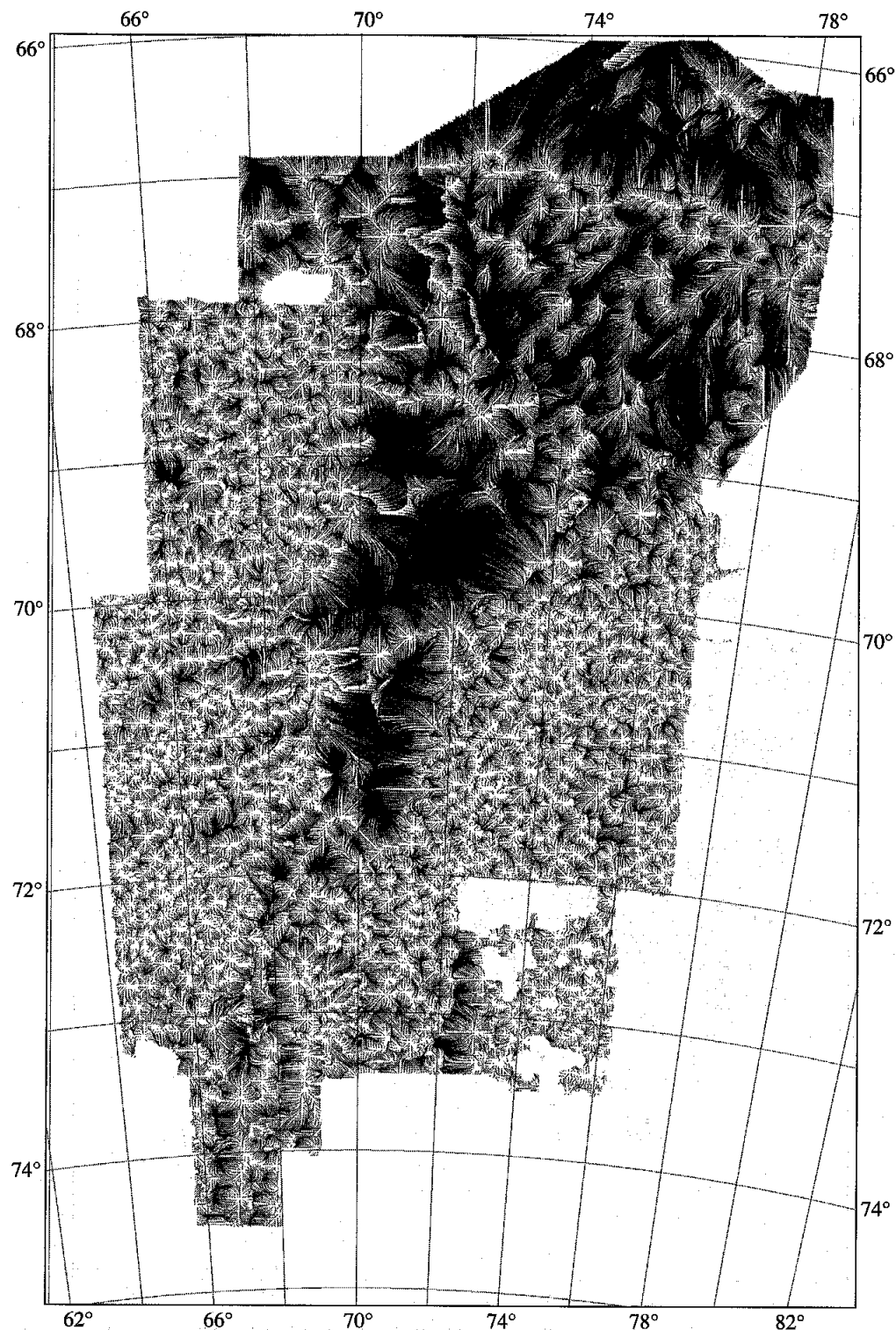


Рис. 4. Карта векторных линий подледно-подводной поверхности района грабена Ламберта (Восточная Антарктика)  
Линии тока и их сгущения показаны зонами различной насыщенности

### Использование структурных линий в практике геолого-гляциологических изысканий

Ранее [8] и выше было отмечено применение СЛ при составлении гипсобатиметрической карты ППП, а также проведении на основе сети СЛ аналитического картографирования ППР на системно-морфологическом принципе. Кроме этого речь должна идти о всех прочих геоморфологических исследованиях и построениях, которые должны осуществляться на основе зафиксированных на карте линейных элементов: орографического картографирования, структурного анализа ППП, изучения морфоструктуры, морфоскульптуры и рельефообразующих процессов с использованием современных методов (учении о симметрии и аналогиях, морфометрические методы). При этом должны сочетаться основные методические направления, разработанные в рамках в морской геоморфологии и геофизики, с применением компьютерных технологий.

Следует иметь в виду, что выраженная в сети СЛ делимость ППП во многом отражает делимость земной коры и различные по кинематике неотектонически (гляциотектонически) активные дизъюнктивные дислокации.

Картографирование СЛ всех типов вносит существенный вклад в изучение динамики ледникового покрова. При этом СЛ могут использоваться в качестве своеобразных створов, над которыми перемещаются в результате растекания и стока льда многочисленные используемые или оставленные человеком на дневной поверхности покрова в известное время различные объекты (станции, бочки из-под горючего, брошенный транспорт и т.д.), а также специально установленные реперы.

При аэрогеофизических (радиолокационных, магнитометрических и др.) исследованиях СЛ выступают в роли строгих указателей оптимальных направлений галсов (обычно вкост простирания СЛ  $L_1$  и  $L_2$  при положительной анизотропии рельефа; см. [7, 9]). Учитывая унаследованность простираний, следует соблюдать рекомендуемые геоморфологией направления галсов, так как полученные профили и графики содержат в себе наибольшую геолого-геофизическую информацию не только об изучаемой поверхности (ППП), но и о строении геофизических полей и земной коры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ласточкин А.Н. Морфодинамическая концепция общей геоморфологии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991. 340 с.
2. Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ. Л.: Недра, 1987. 256 с.
3. Тематическое картографирование: традиции и перспективы / А.М. Берлянт, А.А. Лютый. М.: Изд-во МГУ, 1998. 136 с.
4. Lythe M.B., Vaughan D.G. and BEDMAP Consortium. BEDMAP-bed topography of the Antarctic, 1:10 000 scale map. BAS (Misc 9). Cambridge: British Antarctic Survey, 2000.
5. Ласточкин А.Н., Попов С.В. Результаты и методика геоморфологического картографирования подледно-подводного рельефа впадины Ламберта и ее обрамления (Восточная Антарктида) // Геоморфология. 2002. № 2. С. 80–91.
6. Ласточкин А.Н. Результаты совершенствования систематики элементов земной поверхности // Геоморфология. 1998. № 1. С. 10–20.
7. Ласточкин А.Н. Рельеф земной поверхности. Л.: Недра, 1991. 340 с.
8. Геоморфологические исследования океанического дна / Ласточкин А.Н. Л.: Изд-во ПГО "Севморгеология", 1987. 100 с.
9. Ласточкин А.Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (Геотопология, структурная география и общая теория геосистем). СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. 762 с.
10. Зинченко А.Г., Ласточкин А.Н. Методика геоморфологического картографирования шельфа и континентального склона Российской Федерации (применительно к задачам Госгеолкарты-1000). М.: ЗАО "Геоинформмарк", 2001. 38 с.
11. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. М.: Изд-во МИКАП, 1994. 382 с.
12. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Докл. РАН (ДАН). 2001. Т. 379. Вып. 5. С. 680–685.
13. Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н., Лукин В.В. Основные результаты наземных радиолокационных исследований подледникового озера Восток в период 1998–2002 гг. / Гляциологический симпозиум "Будущее гляциосферы в условиях меняющегося климата". Пущино, 2002. С. 9–10.
14. Девдариани А.С. Измерение перемещений земной поверхности. М.: Наука, 1964. 247 с.

Геофак СПбГУ,  
ПМГРЭ, Ломоносов

Поступила в редакцию  
26.11.2002