

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Харитонов А.Л. Прогнозные оценки углеводород-перспективных областей Антарктики по геофизическим данным, измеренным в пределах концентрических геоморфологических особенностей земной коры и ледникового покрова // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74166 EDN: RLYJKU URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=74166](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74166)

## Прогнозные оценки углеводород-перспективных областей Антарктики по геофизическим данным, измеренным в пределах концентрических геоморфологических особенностей земной коры и ледникового покрова

Харитонов Андрей Леонидович

ORCID: 0000-0002-0843-452X

кандидат физико-математических наук

ведущий научный сотрудник; лаборатория главного магнитного поля Земли; Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

108818, Москва, Десеновское, 3-я Нововатулинская, д.7, кв.56

✉ [Haritonov-magnit@yandex.ru](mailto:Haritonov-magnit@yandex.ru)



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

### DOI:

10.7256/2453-8922.2025.2.74166

### EDN:

RLYJKU

### Дата направления статьи в редакцию:

20-04-2025

**Аннотация:** Предметом исследования настоящей статьи являются концентрические геоморфологические особенности, выявленные на территории Антарктиды в ледниковом покрове, сейсмостектоническом строении земной коры, значениях теплового потока, количества озер. Ранее были выявлены взаимосвязи географического расположения концентрических геоморфологических особенностей и дегазации метановых сипов из подледниковых слоев земной коры на территории Арктики. В статье исследуются концентрические особенности, выявленные по результатам оцифрованных карт рельефа разноглубинных поверхностей (поверхность ледников, «кровля», «подошва» земной коры), значений теплового потока, количества озер на территории Антарктиды по спутниковым, наземным геофизическим данным, используемых для поиска

месторождений углеводородов. Область применения результатов связана с вероятностным прогнозированием регионов, которые являются перспективными для проведения поисковых работ и разведки новых залежей углеводородов на территории Антарктиды. При этом использовались эталонные статистические данные о плотностях распределения мощности коры, теплового потока, соответствующих распределению Гаусса, характерных для концентрических особенностей нефтегазоносных бассейнов России. Впервые показано, что пространственное расположение количества подледниковых озер в пределах определенных площадей концентрических геоморфологических особенностей на территории Антарктиды может быть аппроксимировано в соответствии с распределением описываемым законом Пуассона. Методы проведенного исследования, основаны на положениях теории вероятностей и статистики. Построены гистограммы, плотности распределения, определен средний риск (критерий Бейеса), порог принятия решения значений теплового потока, площадей концентрических особенностей, нормированных на количество подледниковых озер в них, измеренных в пределах расположения 48 концентрических особенностей. Научная новизна проведенных исследований заключается в том, что впервые были определены координаты географического расположения, пространственные размеры (диаметры 200-1000 километров) и сделаны оценки вероятностей, позволяющих прогнозировать углеводород-перспективность 48 концентрических геоморфологических особенностей, выявленных на поверхности ледникового покрова и верхнем и нижнем слоях земной коры на территории Антарктики. Основные выводы проведенного исследования заключаются в выявленных взаимосвязях углеводород-перспективных концентрических геоморфологических особенностей сейсмоструктурного строения земной коры (Мохо), значений теплового потока и плотности распределения подледниковых озер на территории Антарктиды. Практическая новизна исследования заключается в том, что впервые выполнено математическое прогнозирование наличия углеводород-перспективных концентрических геоморфологических особенностей на территории Восточной и Западной Антарктиды.

#### **Ключевые слова:**

Антарктика, концентрические геоморфологические особенности, количество подледниковых озер, методы теории вероятностей, прогноз углеводород-перспективных регионов, спутниковые данные, тепловой поток, структуры ледникового покрова, мощность земной коры, мантийные плюмажи

#### **Введение**

Одним из самых больших по занимаемой площади (14 млн. кв. км), но слабоизученных континентов южного полушария Земли остается территория Антарктики. С учетом шельфовых зон окружающих морей площадь Антарктического континента составляет около 16 млн. кв. км. Этот громадный южный континент, как известно, был открыт в 1819 году российскими мореплавателями Михаилом Лазаревым и Фаддеем Беллинсгаузеном. Большой вклад в изучение глубинного строения Антарктического континента внесли многие российские и зарубежные ученые. Перечислим некоторые научные работы по изучению глубинного строения Антарктики [\[3\]](#); [\[5\]](#); [\[7-8\]](#); [\[10-11\]](#); [\[12\]](#); [\[15\]](#); [\[19-21\]](#); [\[25-26\]](#); [\[27-31\]](#). По прогнозам некоторых экспертов недра Антарктики содержат огромное количество разнообразных природных ресурсов. С 2035 года прекращается международный мораторий на запрет разработки недр на территории Антарктиды. Многие

страны уже начинают готовиться к этому событию, объявляя отдельные регионы Антарктиды своей собственностью. Однако, глубинное строение земной коры на территории Антарктиды долгое время оставалось слабоизученным с помощью наземных геолого-геофизических методов из-за суровых погодных условий (постоянные сильные ветры, низкие температуры воздуха до  $-89^{\circ}\text{C}$ , высокий радиационный фон, озоновые «дыры») и сложностей исследования земной коры из-за мощного (4-х километрового) слоя ледников, покрывающих большую часть этого континента (рис. 1).

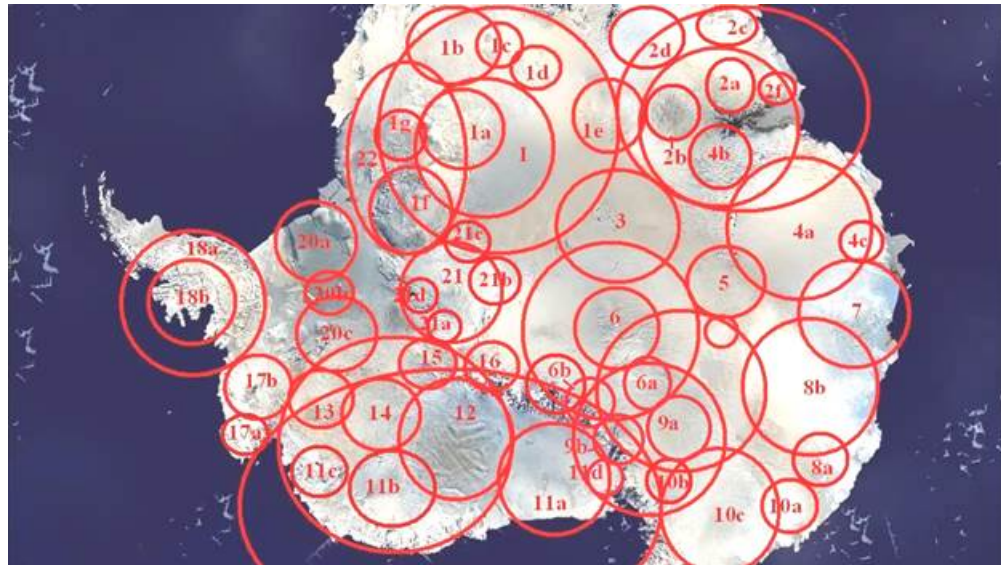


Рис. 1. Карта ледникового покрова на поверхности Антарктиды, по данным [1 с дополнениями автора]. Номера и названия крупных концентрических геоморфологических особенностей (КГО), выделенных автором в рельефе ледникового покрова Антарктиды: 1а – Квин-Модская, 1b – Мауд-Лэндская, 1с – Карпинская, 1d – Бельжикская, 1е – Домефская, 1f – Фаравейская, 1g – Котсовская, 2а – Принц-Чарльзская, 2b – Шунинская, 2с – Кемпская, 2d – Эндербиевская, 2f – Ламбертская, 3 – Советская, 4а – Короткевичская, 4b – Моусонская, 4с – Максимовская, 5 – Восточно-Озерская, 6а – Гамбурцевская, 6b – Александровская, 7 – Голицинская, 8а – Шмидтовская, 8b – Уилксовская, 9а – Конкорд-Озерская, 9b – Керк-Патрикская, 10а – Аделиевская, 10b – Шеклтонская, 10с – Георг-Лэндская, 11а – Росса-Ледниковая, 11b – Сидли-Горская, 11с – Терра-Бэрдская, 11d – Эребусская, 12 – Мэри-Бэрдская, 13 – Бэрдская, 14 – Северо-Бэрдская, 15 – Амундсенская, 16 – Южно-Полюсная, 17а – Сайпллская, 17b – Элсуортская, 18а – Беллинсгзаузенская, 19а – Северо-Уэдделская, 20а – Фильхнерская, 20b – Ронневская, 20с – Винсонская, 21 – Бельгранская, 22 – Скоша-Лэндская.

Все это до последнего времени не позволяло найти месторождения полезных ископаемых на территории Антарктиды. Поэтому в настоящей статье сделана попытка с помощью спутниковых геофизических съемок [11]; [61]; [20-24] изучить глубинное строение Антарктиды, скрытое под мощным (4-х километровым) ледниковым покровом (рис. 1). Например, оптические спутниковые космofотосъемки [11] позволили выделить крупные (диаметром 200-1000 км) концентрические геоморфологические особенности (КГО), наблюдаемые в рельефе ледникового покрова Антарктиды (рис. 1). Геоморфологические особенности ледникового покрова Антарктиды отражают в своей структуре все неоднородности, связанные с различными геолого-геофизическими процессами, происходившими в ее литосфере. Например, зоны повышенного теплового потока [22]; [25]; [27-28]; [30] и наличие впадин в рельефе кристаллического фундамента часто

создают КГО в виде ледниковых концентрических депрессий. Поэтому каждая КГО выделенная в рельефе ледникового покрова Антарктиды (рис. 1) обладает своеобразным рисунком поверхностной структуры ледового покрытия КГО, отличным от других окружающих ее КГО. Иногда внешние границы КГО, выделенные по данным космофотоснимков ледникового покрова Антарктиды, за счет подвижности (сползания) ледников немного смещаются относительно внешних границ КГО, выделенных на поверхности кристаллического основания земной коры. Часто бывает, что в пределах более крупной КГО, по своему пространственному размеру, расположены более мелкие (т.н. «дочерние») локальные КГО [2]; [4]; [9]. Таким образом, кроме крупных КГО (рис. 1), выделенных автором по результатам спутниковых исследований [1]; [20-24], на поверхности ледникового покрова Антарктиды, были обнаружены небольшие по размеру, входящие в более крупную Голицинскую КГО, (т.н. «дочерние») локальные концентрические геоморфологические особенности (КГО) (в области с географическими координатами 66°19'13"S, 100°29'43"E), которые представлены на ниже следующем рис. 2.

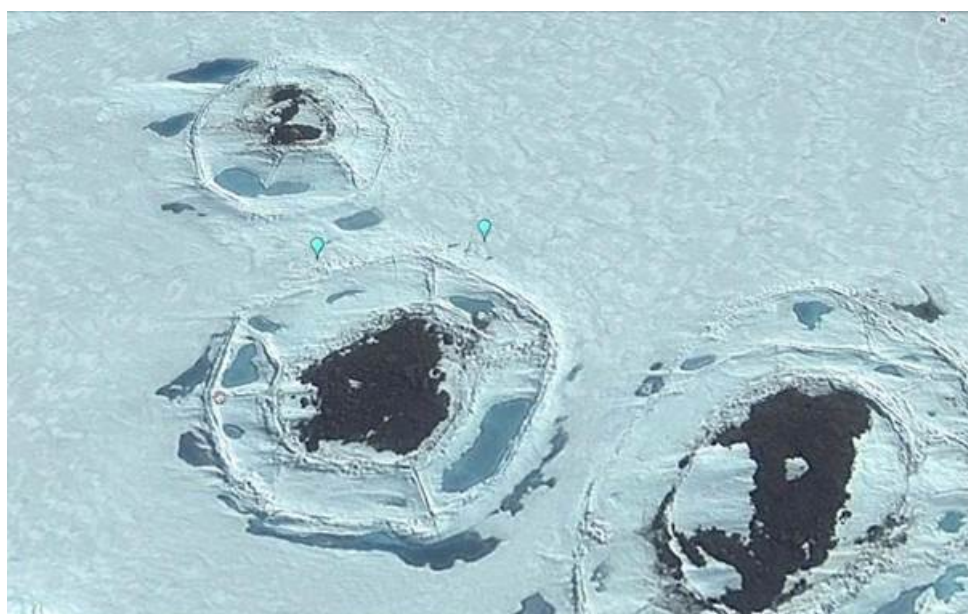


Рис. 2. Локальные концентрические геоморфологические особенности (КГО), выделенные в рельефе поверхности ледникового покрова и в верхних слоях земной коры Антарктиды, в пределах Голицинской КГО [24].

Пространственный размер, выделенных в пределах Голицинской локальной КГО на поверхности Антарктиды составляет около 100-300 метров (рис. 2). Эти локальные концентрические геоморфологические особенности, выделенные на поверхности ледникового покрова и в верхних слоях земной коры Антарктиды имеют сложную кольцевую структуру, состоящую из двух концентрических областей (внутреннюю и внешнюю). Внутренняя (центральная) концентрическая область рассматриваемых локальных КГО это приподнятая над поверхностью ледникового покрова куполообразная область. Внешняя (периферийная) концентрическая область КГО это депрессивная (с ледниковыми озерами) кольцевая область, разбитая радиальными разломами.

Аналогичные локальные КГО недавно выявили на полуострове Ямал [2], Новая Земля [4], Чукотка [9], возникающих в результате таяния слоев вечной мерзлоты и прорыва в атмосферу газовых (метановых) сипов. В результате быстро сформировались глубокие концентрические провалы почвы. Например, 17 августа 2015 года было зафиксировано возникновение глубочайшего концентрического провала почвы на полуострове Ямал,



возникшего в результате взрыва метана [2] (рис. 3).

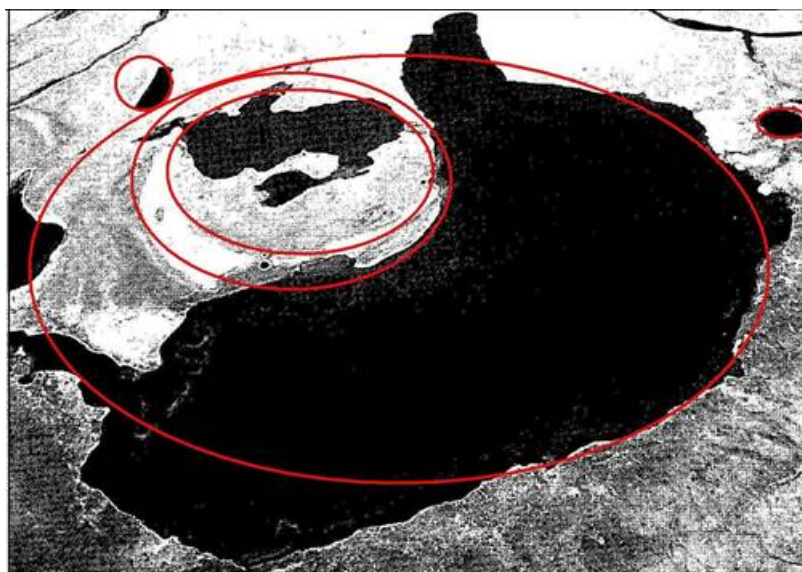


Рис. 3. Локальные концентрические геоморфологические особенности (концентрические провалы почвенного слоя заполненного водой или концентрические цепочки озер), выделенные на севере полуострова Ямал [2 с дополнениями автора].

На рис. 3 представлена локальная концентрическая геоморфологическая особенность (КГО) рельефа дневной поверхности полуострова Ямал, также состоящая из внутренней приподнятой части КГО и периферийной депрессивной части в виде полукольцевой формы озера, возникшего в результате заполнения водой кольцевого кратера этой КГО, сформированного взрывом (выбросом) метана и других природных углеводородов (ПУВ) из земных недр. Эти локальные КГО, как было выявлено [2], возникли в результате уменьшения (таяния) слоев вечной мерзлоты, вследствие общего повышения средней по планете температуры приземной атмосферы. Аналогичные локальные КГО, зафиксированные на территории Антарктиды (рис. 2) по своей геоморфологической структуре очень похожи на локальные КГО, связанные с выбросами газообразных ПУВ, выявленными на севере полуострова Ямал [2] (рис. 3).

### Исходные данные

Измерений, проведенных с помощью магнитного, гравитационного, теплового полей, на поверхности ледникового покрова Антарктиды было крайне недостаточно, для выполнения детального исследования глубинного строения Антарктического региона. На сегодняшний день известно, что пока надежно определена только глубина расположения поверхности Кюри в районе залива Скоша (Скоша-Лэндская КГО), рассчитанная по наземным измерениям магнитного поля составляет от 4 до 37 км [8]. Кроме того, на территории Антарктиды имеются отдельные сейсморазведочные измерения земной коры, выполненные российскими учеными. Например, одно из них сделано вдоль профиля в районе российской антарктической станции Новолазаревская [7] на территории занимаемой Мауд-Лэндской (1b) КГО (рис. 4).

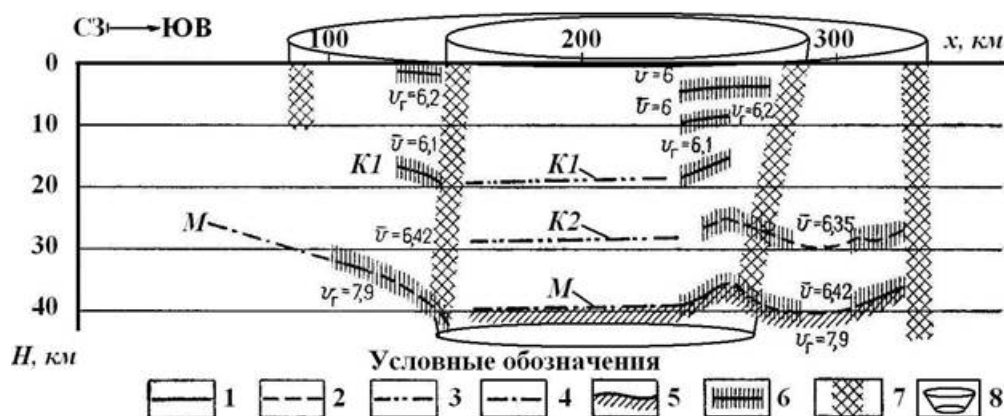


Рис. 4. Глубинный разрез земной коры Антарктиды по данным сейсморазведки [7 с дополнениями автора] на территории Мауд-Лэндской концентрической геоморфологической особенности (КГО) земной коры. Условные обозначения: 1 – расположение уверенно выделенных сейсмических границ; 2 – расположение неуверенно выделенных сейсмических границ; 3 – участки интерполяции сейсмических границ Конрада-1 ( $K1$ ) и Конрада-2 ( $K2$ ); 4 – расположение субгоризонтальных сейсмических границ, подтвержденных гравиметрическими данными; 5 – расположение границы Мохоровичича ( $M$ ); 6 – зоны интерполяции сейсмических границ; 7 – зоны субвертикальных дизъюнктивных нарушений земной коры;  $u$ ,  $u_r$  – обозначения средней и граничной скорости распространения сейсмических волн (км/сек); 8 – субгоризонтальные и субвертикальные границы Мауд-Лэндской КГО, сформированной мантийным плюмажем (астеноконом).

Из данных сейсморазведки, представленных на рис. 4 можно сказать, что скорости распространения продольных волн от поверхности кристаллического фундамента («кровли» земной коры) до поверхности Мохоровичича ( $M$ ) («подшвы» земной коры), в пределах Мауд-Лэндской КГО на севере восточной (платформенной) части Антарктиды изменяются от 6.0 до 7.9 (км/сек). В соответствии с данными сейсморазведки (рис. 4) границы Конрада-1 ( $K1$ ), Конрада-2 ( $K2$ ), Мохоровичича ( $M$ ) в пределах Мауд-Лэндской КГО расположены соответственно на глубинах 19, 29, 40 километров. По данным сейсморазведки (рис. 4) пространственный размер (диаметр) внешнего кольца Мауд-Лэндской КГО составляет около 250 километров, а его внутреннего кольца около 150 километров.

Также автором были использованы наземные региональные сейсмотомографические [26] данные, позволившие построить карту глубинного строения земной коры Антарктиды и окружающих морей (сейсмотомографический срез земной коры), дающей представление о мощности земной коры Антарктиды, в том числе и в районах географического расположения КГО (рис. 5).

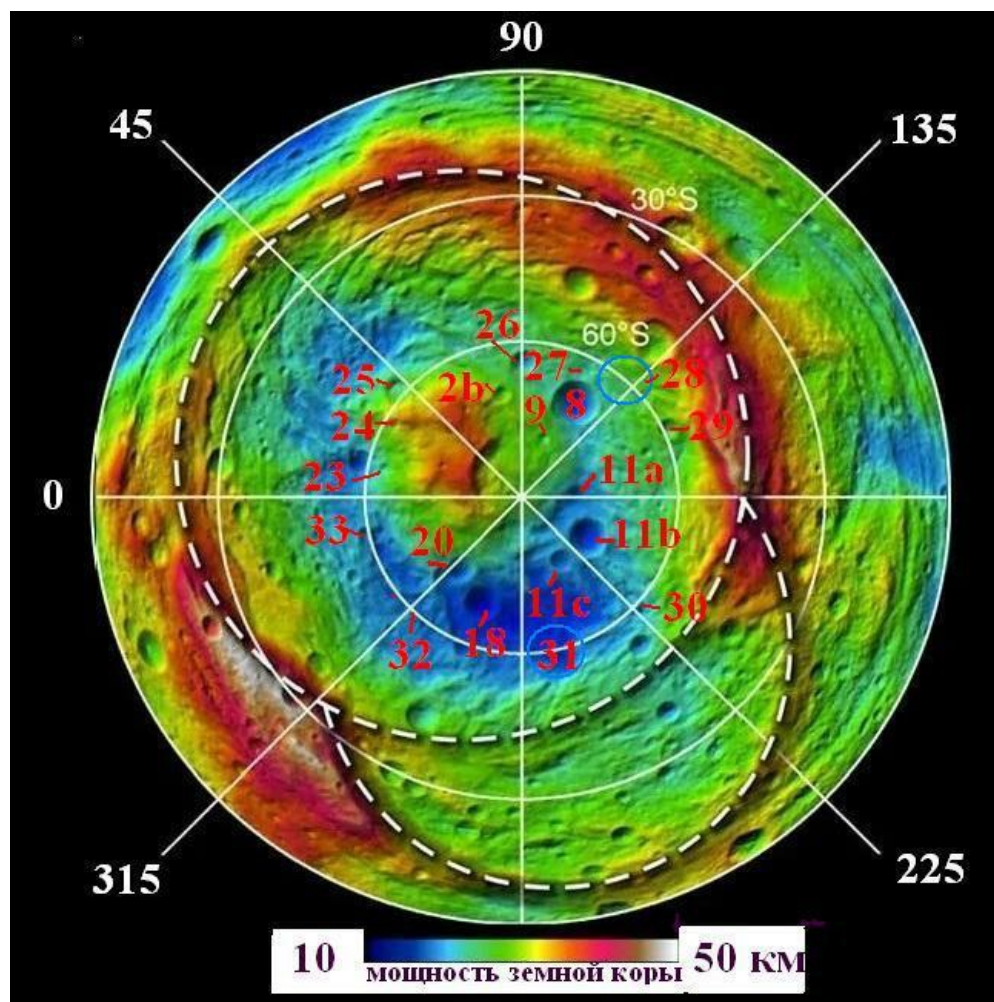


Рис. 5. Карта неоднородностей мощности земной коры, построенная по данным сейсмотомографии [26 с дополнениями автора] для территории Антарктиды и прилегающих акваторий с выделенными концентрическими геоморфологическими особенностями (КГО). Условные обозначения: номера и названия некоторых крупных КГО на территории Антарктиды: 2b – Щунинская; 8b – Уилксовская; 9 – Восточно-Озерская; 11a – Росса-Ледниковая; 11b – Сидли-Горская; 11c – Терра-Бэрдская; 18 – Беллинсгаузенская; 22 – Бельгранская; 23 – Лазаревская; 24 – Рисерская; 25 – Космонавтовская; 26 – Дейвиская; 27 – Победо-Морская; 28 – Адели-Морская; 29 – Дюрвильская; 30 – 225-градусная; 31 – Тваитесская; 32 – Скоша-Морская; 33 – 345-градусная.

Например, по данным сейсмотомографии [26] автором настоящей статьи были выделены аналогичные концентрические геоморфологические особенности (Щунинская, Уилксовская, Восточно-Озерская, Беллинсгаузенская и др.), сформировавшиеся в разрезе земной коры Антарктиды и морей, расположенных вокруг Антарктиды (рис. 5). Некоторые ученые [29], [31] считают, что вся территория Антарктики является глобальной концентрической геоморфологической особенностью (рис. 5), сформированной гигантским мантийным плюмажем (гигаконом) и его региональными и локальными субвертикальными ответвлениями (геоконами, мезоконами, астеноконами, диапирами) (рис. 6).

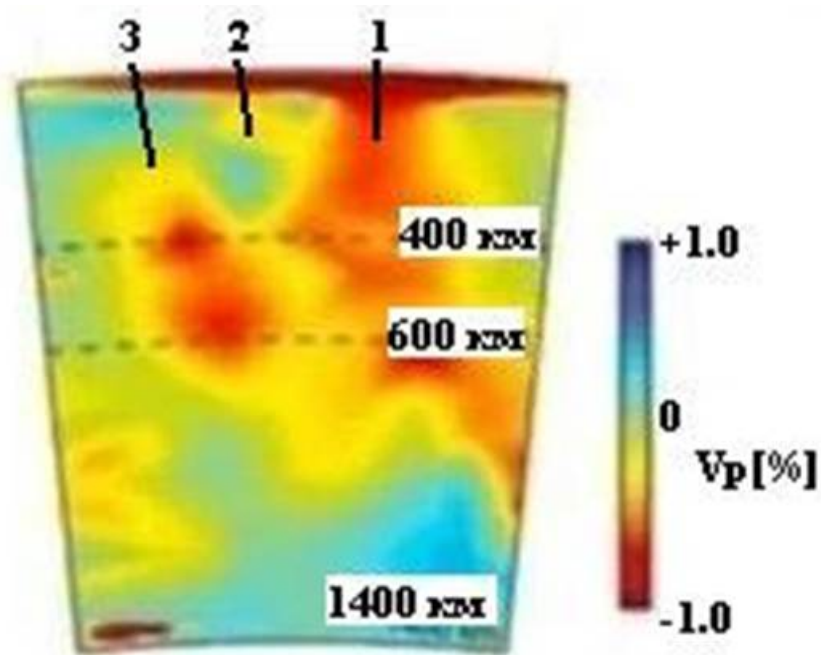


Рис. 6. Вертикальный сейсмотомографический разрез глубинной структуры нижнемантийного плюмажа (Терра-Бэрдского геокона) (1) и «дочерних» мезомантийного плюмажа (мезокона) (3) и верхнемантийного плюмажа (астенокона) (2) на территории Антарктиды (неоднородности сейсмоскоростной структуры плюмажей мантии, выделены красным и желтым цветом) (в % отклонения от средней скорости сейсмических  $V_p$ -волн) [29 с дополнениями автора]. 1 – пример типичного (так называемого «материнского») антарктического нижнемантийного плюмажа, расположенного на западе Антарктиды (11с – Терра-Бэрдский геокон); 2 – «дочерний» антарктический верхемантийный плюмаж (Бэрдский астенокон); 3 – «дочерний» антарктический мезомантийный плюмаж (Винсонский мезокон).

Общую структуру типичных мантийных плюмажей Антарктиды, определенную по сейсмическим ( $V_p$ ) данным можно видеть на выше представленном сейсмотомографическом разрезе (рис. 6), показывающему субвертикальную структуру т.н. «материнского» Терра-Бэрдского нижнемантийного плюмажа (1), расположенного в западной части Антарктиды, с боковыми мезо- и верхне-мантийными ответвлениями «дочерних» мантийных плюмажей (2-Бэрдского, 3-Винсонского). Из сейсмотомографического разреза мантии (рис. 6) видно, что корни Терра-Бэрдского нижнемантийного плюмажа (геокона) Западной Антарктиды расположены на глубине более 1400 километров. Региональные КГО (радиусом 200-1000 км) (рис. 1), сформированные антарктическими астеноконами, мезоконами, геоконами (с «корнями» на глубине около 200-1500 км), могут позволить выделить углеводород-перспективные и бесперспективные регионы для дальнейшей постановки детальных наземных геолого-разведочных (сейсморазведочных) исследований месторождений природных углеводородов (ПУВ), подобно исследованиям, проведенным в работе [16]. Локальные (100-300 м) концентрические геоморфологические особенности земной коры, выявленные в ледниковом покрове Антарктиды, в пределах более крупной Голицинской КГО (рис. 2), сформированы допалеозойскими мантийными плюмажами (ДМПП) и диапирами (ДПМД) [16]; [29]; [31], через разломные структуры которых происходит дегазация-дегидратация мантии [12]; [14] и тепломассоперенос разогретых мантийных геофлюидов в верхние слои земной коры [2]; [9], часто содержащих, в том числе, и ПУВ.



Аналогичные КГО, были выделены автором на территории российского сектора Арктики и Субарктики [16] с найденными там многочисленными месторождениями ПУВ. Можно предположить, что и на территории Антарктиды также могут быть найдены подобные месторождения ПУВ. Если на территории Антарктиды, по региональным исследованиям автора настоящей статьи, будут найдены первые месторождения ПУВ, то они повысят интерес к более активному освоению территории Антарктиды. В дальнейшем это может избавить расположенные там российские исследовательские антарктические станции от ежегодного завоза горючего с территории нашей страны. Но, для поиска месторождений ПУВ на территории Антарктиды пока можно использовать только ограниченное количество наземных геолого-геофизических данных (ГГД) из-за их недостатка, вследствие относительно слабой изученности этой огромной территории, особенно в ее центральных регионах восточной (материковой) части. Поэтому для изучения особенностей глубинного строения всей территории Антарктиды и прилегающих акваторий автором были использованы достаточно детальные спутниковые данные, полученные в последнее время (альтиметрические [20]; [21], различного диапазона (инфракрасные, ультрафиолетовые) радарные измерения, измерения магнитного поля (рис. 7) [23]).

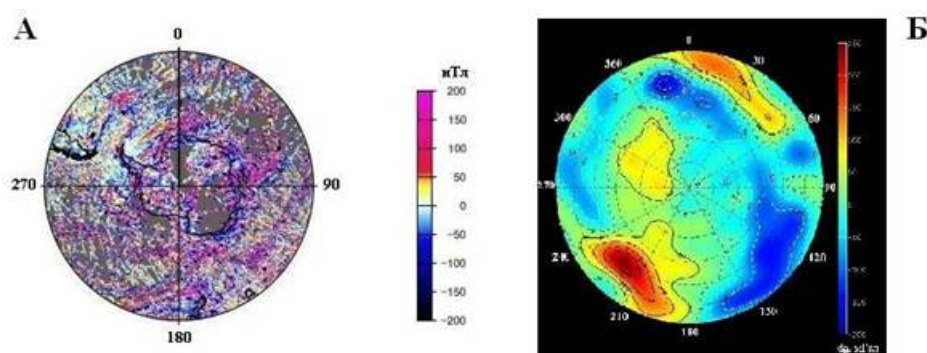


Рис. 7. Спутниковые карты аномалий магнитного (А) и гравитационного (Б) полей Антарктиды и прилегающих морей по данным искусственных спутников Земли (ИСЗ) MAGSAT [23], GOCE [20]; [21].

Известно, что из-за очень сложных природных условий, наземных геофизических данных, измеренных на поверхности Антарктиды было выполнено крайне недостаточно, и особенно, в ее центральных регионах. Поэтому автору этой статьи пришлось использовать вспомогательные геоморфологические данные, полученные по спутниковым измерениям [1]; [20-24]. Например, из данных о геоморфологии особенностей ледникового покрова Антарктиды, представленных на рис. 1, видно, что в рельефе ледникового рельефа отчетливо просматриваются некоторые концентрические геоморфологические особенности (КГО) разного пространственного размера (диаметра) и разной структурой ледниковой поверхности. Кроме того, достаточно неплохо относительно других геофизических методов, на территории Антарктики были изучены значения региональных аномалий гравитационного поля (рис. 7Б) по спутниковым гравиметрическим (альтиметрическим) [20]; [21] данным, результаты которых были использованы для уточнения глубины расположения поверхности Мохоровичича. По наземным измерениям гравитационного [15] и волнового [7-8]; [10-11]; [19] полей и спутниковым магнитным (рис. 7А) [23] и спутниковым гравиметрическим (альтиметрическим) измерениям (рис. 7Б) [20]; [21] была построена карта рельефа

поверхности Мохоровичича (вертикальной мощности земной коры -  $H_K$ ) для территории Антарктиды и сопредельных морей (рис. 8).

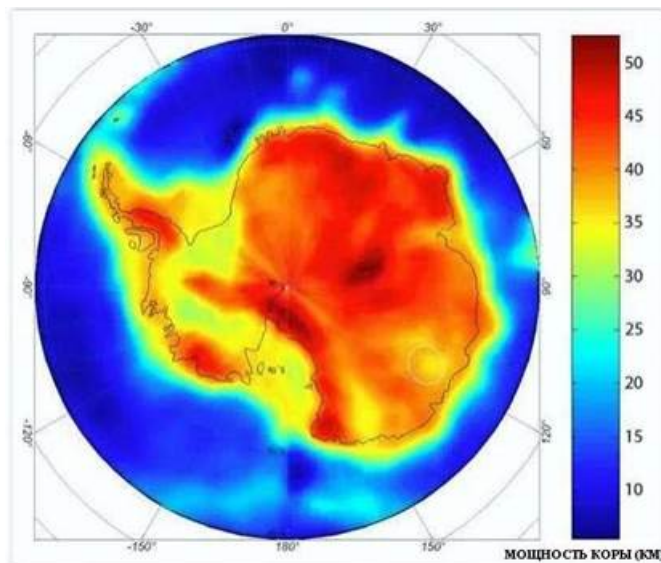


Рис. 8. Карта мощности земной коры (глубины до поверхности Мохоровичича ( $M$ )) на территории Антарктиды и сопредельных морей по данным [7-8]; [10-11]; [15]; [19].

По данным карты мощности земной коры (глубины до поверхности Мохоровичича ( $M$ )) для территории Антарктиды (рис. 8), можно сказать, что среднее значение вертикальной мощности земной коры ( $H_K$ ) в восточной (платформенной) части Антарктиды составляет около  $H_K = 40$  километров, а в ее западной (палеорифтовой) части около  $H_K = 30$  километров. Но, как можно видеть из данных, приведенных на рис. 8, что и восточной части Антарктиды имеются определенные области, где мощность земной коры не превышает  $H_K \approx 30$  километров. Аналогичные области с небольшой мощностью земной коры характерны для нефтегазоносных областей Западной Сибири, Ямала [3]; [5]. По многочисленным геофизическим данным [7]; [8]; [10-11]; [15]; [19] была построена и тектоническая карта для территории Антарктиды [13] (рис. 9).

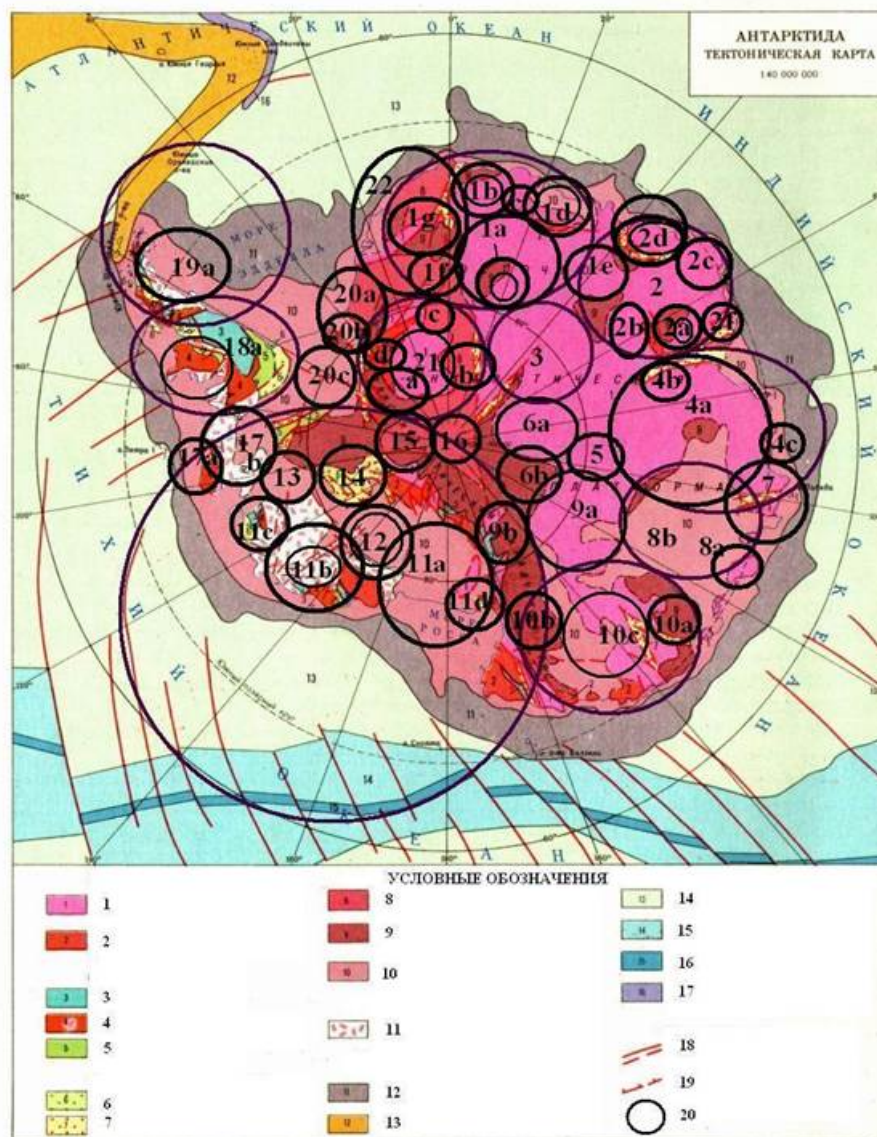


Рис. 9. Тектоническая карта территории Антарктиды [13 с дополнениями автора].  
 Условные обозначения: континентальная земная кора: 1 – выступы раннедокембрийского кристаллического фундамента; 2 – выступы позднедокембрийского метаморфического фундамента; складчатые комплексы: 3 – раннепалеозойские; 4 – позднепалеозойские; 5 – мезозойские; передовые и межгорные прогибы: 6 – позднемезозойские; 7 – кайнозойские рифтогенные; возраст пород платформенного чехла: 8 – протерозойский; 9 – фанерозойский; 10 – мезозойско-кайнозойский; 11 – кайнозойский платформенный вулканизм; переходные зоны от континента к океану: 12 – континентальный склон; 13 – островные дуги; зоны субокеанической коры: 14 – позднемезозойские; 15 – срединно-океанические хребты; 16 – рифтовые зоны срединно-океанических хребтов; 17 – глубоководные желоба; 18 – тектонические разломы; 19 – рифтовые зоны; 20 – номера и названия КГО, обозначенных на тектонической карте смотрите в условных обозначениях к рис. 1.

Основываясь на данных, представленных на тектонической карте (рис. 9), территорию Антарктиды в региональном плане можно разделить на древнюю (рифейского возраста) земную кору континентального типа Восточно-Антарктической платформы и более молодую (раннемезозойского возраста) кору рифтогенного субокеанического (переходного к океаническому) типа Западно-Антарктической складчатой области. Из данных представленных на рис. 9 видно, что КГО в центральной и восточной части

Антарктиды (например, 1b – Мауд-Лэндская, 1d – Бельжикская, 2a – Принц-Чарльзская, 2d – Эндербиевская, 10с – Георг-Лэндская, центральная часть 21 – Бельгранской КГО) в центральных концентрических областях чаще всего сложены породами раннедокембрийского кристаллического фундамента (обозначение 1 в усл. обозн. Рис. 9), а периферийные кольцевые области сложены выступами протерозойского возраста (обознач. 8 в усл. обозн. Рис. 9) и фанерозойского возраста (обознач. 9 в усл. обозн. Рис.9).

К сожалению, значения аномалий теплового потока (АТП) ( $Q$ ) на территории Антарктиды по наземным измерениям изучены пока только в одном из ее районов (о. Росс) [28]. Но в последнее время появились спутниковые данные об АТП [22], [27], [30], поступающего с подледниковой поверхности Антарктиды (рис. 10).

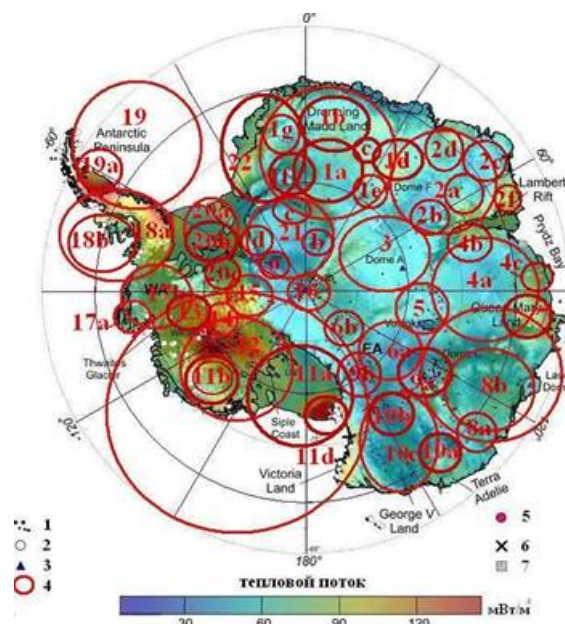


Рис. 10. Карта аномалий теплового потока (АТП) на территории Антарктиды [22 с дополнениями автора]. Условные обозначения: 1 – географическое расположение подледниковых озер («линз» гидротермальных геофлюидов); 2 – место географического расположения вулканов; 3 – место географического расположения источников воды (ключей); 4 – индексы и названия КГО, обозначенных на карте АТП смотрите в условных обозначениях к рис. 1; 5 – место расположения пунктов измерения теплового потока; 6 – пункты измеренных значений АТП; 7 – пункты смоделированных значений АТП.

По спутниковым данным карты аномалий теплового потока (АТП) (рис. 10) автором также были выделены концентрические геоморфологические особенности (КГО) на территории Антарктиды, которые по своему пространственному расположению аналогичны географическому расположению КГО, выделенных по данным тектонической карты (рис. 9) и карты ледникового покрова (рис. 1). В некоторых из этих антарктических КГО (рис. 10) плотность распределения подледниковых озер значительно выше, чем в окружающих КГО, представленных на рис. 10. То есть, на территории Антарктиды (рис. 10), существует несколько КГО с высокими и очень высокими значениями плотности распределения подледниковых озер (например, 1d – Бельжикская, 1e – Домефская, 1f – Фаравейская, 5 – Восточно-Озерская, 9 – Конкорд-Озерская, 10с – Георг-Лэндская, 12 – Мэри-Бэрдская, 16 – Южно-Полюсная, 20с – Винсонская, 21d – Северо-Бельгранская).

### Методы исследования



Предлагаемые вероятностно-статистические методы [18] позволяют выполнить надежное количественное исследование по прогнозированию углеводород-перспективных КГО на территории Антарктиды. Для поиска месторождений природных углеводородов (ПУВ) были использованы разные данные, полученные как в результате применения основных геофизических методов (гравиразведка, космомагниторазведка, геотермия, сейсморазведка) [3-4], [7-11], [21], [23], [25-26], [27-28], [29-31], так и вспомогательных геоморфологических [6] методов (спутниковые геодезические методы определения высот рельефа ледниковой (рис. 1) [1], [24] и подледниковой поверхности (рис. 9), а также спутниковые радарные методы просвечивания ледникового покрова и верхнего слоя земной коры, методы анализа расположения гидротермальных ключей подледниковой озерной сети (рис. 10)) [22]. Одним из важных геоморфологических методов, который был использован автором для поиска месторождений ПУВ на территории Антарктиды, является выделение зон гидротермальной или газотермальной (в том числе вулканической) дегазационной деятельности земных недр (анализ плотности распределения подледниковых озер (рис. 10)). То есть, исходя из теоретических предпосылок, чем больше на территории Антарктиды будет найдено источников гидротермальной или газотермальной (дегазационной) [12], [14] деятельности недр, тем выше вероятность нахождения в этих КГО залежей ПУВ. Поэтому, на поверхности кристаллического фундамента земной коры, под мощным ледниковым щитом Антарктиды, автором были выявлены, по спутниковым фото [1], [24], геотермальным [22] данным, крупные линзы жидкости (подледниковые озера) (рис. 10), которые также могут содержать в составе подледниковой озерной жидкости значительное количество жидких ПУВ или природного газоконденсата, по аналогии с газовыми сипами арктических морей и дегазации метана в атмосферу в Чукотской тундре [9] и формирования огромных провалов в зонах таяния слоев вечной мерзлоты в Ямальной тундре [2] в результате прорывов залежей метана из-под слоев вечной мерзлоты.

Для расчетов углеводород-перспективных КГО на территории Антарктиды автором были использованы как цифровые данные полученные из комплекса геофизических методов, позволившие определить значения вероятности  $P_1(H_K)$  в зависимости от глубины до поверхности Мохоровичича (от значений вертикальной мощности земной коры) (рис. 8), значения вероятности  $P_2(Q)$  в зависимости от значений аномалий теплового потока (рис. 10), значения вероятности  $P_3(s^*)$  в зависимости от значения площади КГО ( $s^*$ ), нормированной на количество подледниковых озер ( $n_{оз}$ ) (рис. 10), расположенных в пределах каждой КГО на территории Антарктиды. Целый ряд исследователей глубинного строения Антарктиды [5-8], [10-13], [15], [19-31] показывают, что территорию Антарктиды необходимо анализировать отдельно в восточной и западной ее частях. Это связано с тем, что большая часть исследователей территорию Восточной Антарктиды относит к платформенным регионам, а территорию Западной Антарктиды к рифтогенным регионам. При этом все известные вероятностные критерии принятия решений о наличии или отсутствии «полезной аномалии» в исследуемых геофизических данных, были приняты на основе теории проверки статистических гипотез (I-го и II-го рода) [18]. Для проверки статистических гипотез была использована информация о цифровых данных, представленных на гистограммах  $N(\Phi_i)$  и графиках плотностей распределения для гипотезы наличия  $p(\Phi_i/H_1)$  и отсутствия  $p(\Phi_i/H_0)$  «аномалии» в анализируемых видах геофизических данных.

Для проведения расчетов с помощью вероятностно-статистических методов исследования [18] мы обозначили фиксированную выборку ряда из  $j$  исследуемых значений  $f(x_j)$  для каждого вида геофизических данных ( $\Phi_f(x_j)$ ) как:

$$\Phi_f(x_j) = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_j)] \quad (1)$$

При построении графиков статистической плотности распределения для значений площадей КГО ( $s$ ), нормированных на количество подледниковых озер ( $n_{оз}$ ), которые могут быть обозначены как величина ( $s^*$ ):

$$s^* = [(s/10^3)/n_{оз}] \text{ (км}^2\text{)}, \quad (2)$$

Проведенный вероятностно-статистический анализ распределения подледниковых озер, расположенных в пределах выделенных КГО на территории Антарктиды показал, что значения площадей ( $s$ ) занимаемых теми или иными КГО, нормированных на количество озер ( $n_{оз}$ ) в этих КГО, можно представить в виде статистической плотности распределения  $p_c(m, L)$  значений ( $s^*$ ), приведенной к уровню значений теоретической плотности распределения Пуассона  $p(m, L)$  [18] для восточной континентальной (рис. 11А) и западной рифтогенной (рис. 11Б) частей Антарктиды по формуле 3 (или по значениям соответствующих таблиц [18]).

$$p(m, L) = (L^m / m!) \times \exp(-L), \quad (3)$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots, m_{\max}$  – максимальное количество значений по горизонтальной оси графиков статистических плотностей распределения Пуассона рассчитываются согласно [18] как корень квадратный ( $m_{\max} = \sqrt{j}$ ) из количества анализируемых значений  $s^*(j)$  отдельно для восточной ( $m_{\max} = \sqrt{32} \approx 6$ ) и западной ( $m_{\max} = \sqrt{16} \approx 4$ ) частей Антарктиды. При этом ширина диапазона  $\Delta s^*$  для значений  $s^*(j)$  на территории Антарктиды для каждого ( $m = 1, 2, 3, \dots, m_{\max}$ ) рассчитывался согласно [18] как:

$$\Delta s^* = [s^*_{\max} - s^*_{\min}] / m_{\max} = (0 - 242) / 6 \approx 40 \text{ (км}^2\text{)} \text{ для восточной части Антарктиды} \quad (4a)$$

$$\Delta s^* = [s^*_{\max} - s^*_{\min}] / m_{\max} = (0 - 242) / 4 \approx 60 \text{ (км}^2\text{)} \text{ для западной части Антарктиды} \quad (46)$$

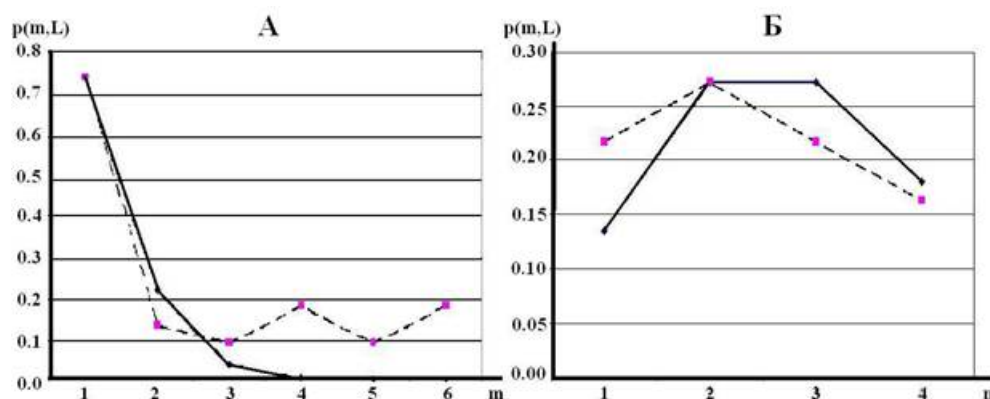


Рис. 11. А – графики статистической плотности распределения  $p_c(m, L)$  значений площадей ( $s$ ) занимаемых исследуемыми КГО, нормированных на количество озер ( $n_{оз}$ ) в

этих КГО, расположенных на территории восточной (платформенной) части Антарктиды (пунктирная линия) и графики теоретической плотности распределения Пуассона  $p(m, L)$  при  $L = 0.3$  (сплошная линия) [18]. На графиках статистической плотности распределения  $p_c(m, L)$  значений площадей ( $s^*$ ) занимаемых исследуемыми КГО, нормированных на количество озер ( $n_{оз}$ ) в этих КГО в Восточной Антарктиде значение  $m = 1$  соответствует значениям  $\Delta s_1^* = 0-40$  (км<sup>2</sup>);  $m = 2$  соответствует значениям  $\Delta s_2^* = 41-80$  (км<sup>2</sup>);  $m = 3$  соответствует значениям  $\Delta s_3^* = 81-120$  (км<sup>2</sup>);  $m = 4$  соответствует значениям  $\Delta s_4^* = 121-160$  (км<sup>2</sup>);  $m = 5$  соответствует значениям  $\Delta s_5^* = 161-200$  (км<sup>2</sup>);  $m = 6$  соответствует значениям  $\Delta s_6^* = 201-240$  (км<sup>2</sup>); Б – графики статистической плотности распределения  $p_c(m, L)$  значений площадей ( $s$ ) занимаемых исследуемыми КГО, нормированных на количество озер ( $n_{оз}$ ) в этих КГО, расположенных на территории западной (рифтогенной) части Антарктиды (пунктирная линия) и графики теоретической плотности распределения Пуассона  $p(m, L)$  при  $L = 2.0$  (сплошная линия). На графиках статистической плотности распределения значений площадей ( $s^*$ ) занимаемых исследуемыми КГО, нормированных на количество озер ( $n_{оз}$ ) в этих КГО в Западной Антарктиде значение  $m = 1$  соответствует значениям  $\Delta s_1^* = 0-60$  (км<sup>2</sup>);  $m = 2$  соответствует значениям  $\Delta s_2^* = 61-120$  (км<sup>2</sup>);  $m = 3$  соответствует значениям  $\Delta s_3^* = 121-180$  (км<sup>2</sup>);  $m = 4$  соответствует значениям  $\Delta s^* = 181-240$  (км<sup>2</sup>).

Графики статистической плотности распределения, представленные на рис. 11 показывают, что значения площадей КГО ( $s^*$ ), нормированных на количество подледниковых озер ( $n_{оз}$ ), расположенных в пределах большинства из  $j = 48$  исследуемых КГО на территории восточной (рис. 11А) и западной (рис. 11Б) частей Антарктиды может быть описано законом распределения Пуассона, согласно [18]. Затем по таблицам для расчета суммарных вероятностей для распределения Пуассона [18] были определены значения вероятностей  $P(s^*)$  для каждой КГО, расположенной в пределах восточной и западной частей Антарктиды, которые представлены ниже в таблице.

По результатам проведенного автором вероятностно-статистического анализа значений аномалий теплового потока (АТП), проанализированных в пределах  $j = 48$  исследуемых КГО, как для восточной (платформенной), так и для западной (рифтогенной) частей территории Антарктиды, были построены статистические гистограммы, которые представлены на рис. 12 А,Б.

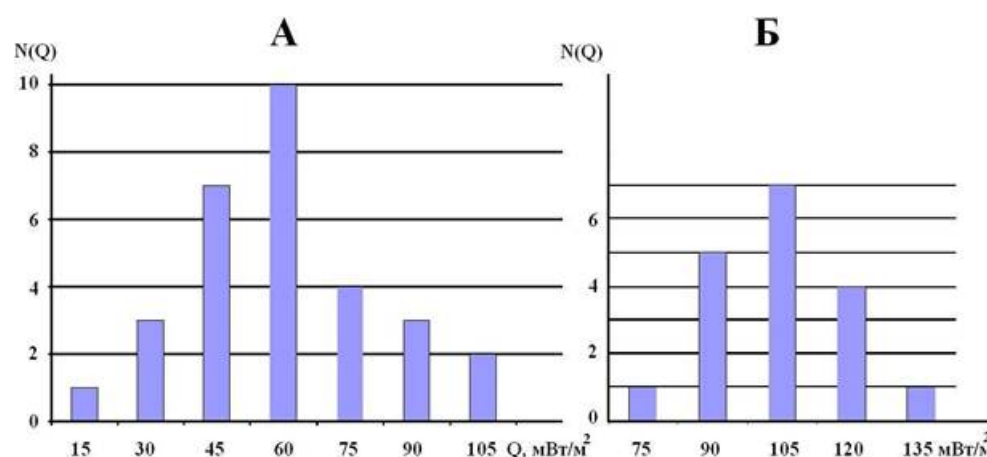


Рис. 12. А - графики статистических гистограмм  $N(Q)$  значений теплового потока ( $Q$ ),

расположенных в пределах КГО на территории восточной (платформенной) части Антарктиды; Б – графики статистических гистограмм  $N(Q)$  значений теплового потока ( $Q$ ), расположенных в пределах КГО на территории западной (рифтогенной) части Антарктиды.

Гистограмма, также как и понятие классической вероятности, описывает распределение частот  $N(\Phi_j) = (k/j)$ , определяемых для каждого из  $j$  - общего количества значений ( $\Phi_j$ ) ряда случайных величин определенного вида геофизических данных [18]. Статистическая гистограмма распределения значений АТП в пределах расположения КГО на территории восточной (платформенной) части Антарктиды (рис. 12А) имеет максимальное значение, которое соответствует  $Q = 60$  мВт/м<sup>2</sup>. Гистограмма АТП для восточной (платформенной) части Антарктиды по своим значениям близка к значениям среднестатистической гистограммы, построенной по данным всех континентальных регионов Земли в целом ( $Q = 45-60$  мВт/м<sup>2</sup>), приведенной в работе [3]. В правой части этого рисунка (рис. 12Б) изображена гистограмма АТП для западной (рифтогенной) части Антарктиды с максимумом гистограммы, который соответствует значениям  $Q = 105$  мВт/м<sup>2</sup>. При этом в рифтогенных районах Земли (например, Калифорния), где отмечена повышенная дегазация геофлюидов различного химического состава из недр (радон, углерод) [17] и выявлены месторождения углеводородов, значения АТП в рифтогенных зонах ( $Q = 60-150$  мВт/м<sup>2</sup>) в зависимости от региона [5, с. 70, рис. 33]; [3, с.220, рис. 6.5в], как правило, значительно выше значений АТП для нефтегазоносных областей (НГО) в платформенных (слабоперспективных) регионах РФ ( $Q = 60$  мВт/м<sup>2</sup>). Аналогичная разница в значениях АТП наблюдается для регионов в западной и восточной частях Антарктиды. По данным гистограмм для значений АТП на территории Антарктиды (рис. 12) были построены графики соответствующих плотностей распределения (рис. 13).

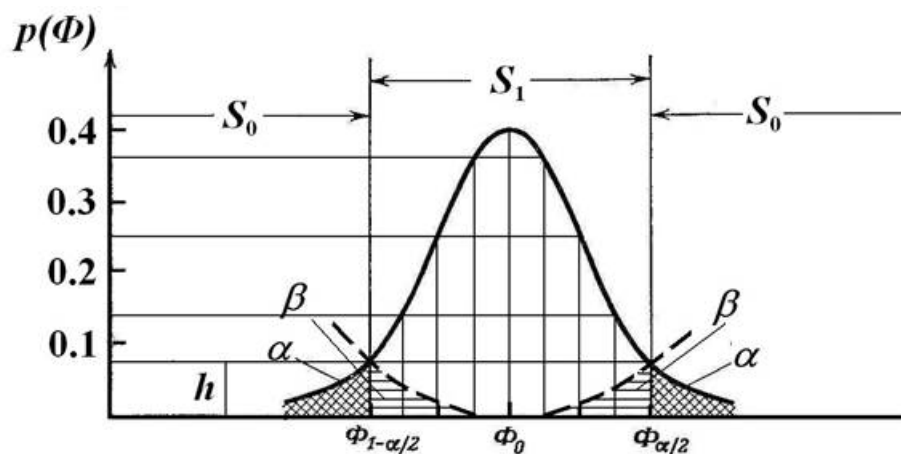


Рис. 13. Графики кривых плотностей распределения  $p(\Phi_i)$  соответствующих закону нормального распределения Гаусса (для нормально ( $S_1$ ) и аномально ( $S_0$ ) распределенных значений) [18], характерных для значений мощности земной коры ( $H_K$ ) и теплового потока ( $Q$ ), определенные для западной и восточной частей Антарктиды.

Проверка показала, что графики плотности распределения таких геолого-геофизических данных (ГГД) ( $H_K$ ,  $Q$ ) для территории Восточной и Западной Антарктиды соответствуют закону нормального распределения Гаусса (рис. 13). Учитывая, что проанализированные ГГД о плотности распределения мощности земной коры ( $H_K$ ) и аномалий теплового потока ( $Q$ ) на территории Антарктиды, а также полученные ранее



ГГД, в пределах НГО РФ в континентальных и переходных (субокеанических) регионах (где  $H_k = 27 \pm 18$  км;  $Q = 105 \pm 45$ ) [16], подчиняющихся закону нормального распределения Гаусса, то данные для плотностей распределения в НГО РФ были использованы как эталонные при расчетах вероятностей для каждой исследуемой КГО на территории Антарктиды для гипотез наличия полезной «аномалии»  $p(\Phi_i/H_1)$  и ее отсутствия  $p(\Phi_i/H_0)$ .

Из данных, приведенных на рис. 13 можно видеть, что на графике теоретической плотности распределения Гаусса  $p(\Phi_i/H_1)$  существуют две области ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), связанные с ошибками I и II рода. Вероятность ошибки I рода, обнаружения ложной аномалии ( $\alpha$ ) определяется следующим интегральным выражением:

$$\alpha = \int p(\Phi_i/H_0) d\Omega(\Phi_i), \quad (5)$$

где  $d\Omega(\Phi_i)$  –  $n$ -мерное пространство выборки анализируемых значений ГГД.

Вероятность ошибки II рода, пропуска действительной аномалии ( $\beta$ ) определяется следующим интегральным выражением:

$$\beta = \int p(\Phi_i/H_1) d\Omega(\Phi_i) \quad (6)$$

По данным, представленным на графиках теоретических плотностей распределения исследуемых видов ГГД, собранных в пределах территорий занимаемых НГО РФ были определены значения вероятностей  $P_a(\Phi_i/H_1)$ ,  $P_a(\Phi_i/H_0)$ . В результате, подсчета значений этих вероятностных параметров ( $\alpha$ ,  $\beta$ ), зафиксированных в зонах пересечения кривых плотностей распределения было определено значение среднего риска принятия решения по формуле:

$$r(h) = C_\alpha \times P_a(\Phi_i/H_0) \times \alpha + C_\beta \times P_a(\Phi_i/H_1) \times \beta, \quad (7)$$

где  $P_a(\Phi_i/H_1)$ ,  $P_a(\Phi_i/H_0)$  - называются априорными вероятностями гипотез наличия  $H_1$  и отсутствия  $H_0$  полезной аномалии;  $C_\alpha$  и  $C_\beta$  - цены ошибок I и II рода.

Используя эти данные определялись значения порога ( $h$ ) принятия, разделяющего пространство  $d\Omega(\Phi)$  значений используемого вида ГГД на две области  $S_1$  и  $S_0$  условной плотности распределения  $p(\Phi_i/H_1)$  и  $p(\Phi_i/H_0)$ . Минимизация среднего риска по критерию Байеса привела к определению значения порога принятия решения равному:

$$h = [C_\alpha \times P_a(\Phi_i/H_0)] / [C_\beta \times P_a(\Phi_i/H_1)], \quad (8)$$

Далее, по каждому виду ГГД на территории Антарктиды в пределах каждой из  $j=48$  анализируемых КГО, по радиальным направлениям КГО определялось среднее значение каждого вида ГГД. Затем для этого среднего значения ГГД, полученного в пределах каждой КГО, на основании сравнения с графиком теоретической плотности распределения [18], проводился расчет коэффициента правдоподобия ( $\Lambda$ ) для каждой исследуемой КГО по следующей формуле [18]:

$$\Lambda(\Phi_i) = [p(\Phi_i/H_1) / p(\Phi_i/H_0)] \quad (9)$$

Затем для каждой исследуемой КГО проводилась сравнение рассчитанного порогового значения ( $h$ ), определенного по каждому виду ГГД на территории НГБ, с коэффициентом

правдоподобия ( $\Lambda$ ). Если значения коэффициента правдоподобия ( $\Lambda$ ) для исследуемой КГО было выше порогового значения ( $h$ ) исследуемого вида ГГД, то принималось решение о гипотезе наличия ( $H_1$ ) аномалии этого вида ГГД, в противном случае – решение о гипотезе ее отсутствия ( $H_0$ ) в пределах этой КГО. Если значение коэффициента правдоподобия ( $\Lambda$ ) для исследуемой КГО было выше порогового значения ( $h$ ), то тогда уже по значениям теоретической плотности распределения  $p(\Phi_i/H_1)$  рассчитывалось значение вероятности  $P(\Phi_i/H_1)$  для исследуемой КГО по каждому виду ГГД. Для этого использовался график одномерной теоретической плотности распределения  $p(\Phi_i/H_1)$ , расположенный в области  $S_1$ .

Известно, что одномерная теоретическая плотность распределения  $p(\Phi_i/H_1)$  случайного процесса определяет вероятность того, что значения этого процесса в произвольный момент ( $x$ ) расположения на профиле измерений будут заключены в определенном интервале ( $\Delta\Phi_i$ ) и при этом значения вероятности  $P(\Phi_i/H_1)$  и теоретической плотности распределения  $p(\Phi_i/H_1)$  случайного процесса, могут быть представлены в виде следующей формулы [18]:

$$P(\Phi_i/H_1)\{\Phi_i < [\Phi_i(x)/H_1] < \Phi_i + \Delta\Phi_i\} \approx p(\Phi_i/H_1) \times \Delta\Phi_i \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что вероятность  $P(\Phi_i/H_1)$  наличия определенного события (аномалии ГГД) ( $\Phi_i$ ) с точностью до величины этого интервала ( $\Delta\Phi_i$ ) будет соответствовать значению теоретической плотности распределения  $p(\Phi_i/H_1)$  случайного процесса. Затем, на основании вышеизложенных методов обработки данных, был произведен расчет вероятностей по трем исследуемым видам ГГД ( $H_K$ ,  $Q$ ,  $s^*$ ) в пределах каждой из 48 исследуемых КГО на территории Антарктиды. Для получения окончательного результата проведенных исследований по вероятностям всех трех видов используемых ГГД  $P(\Phi_i)$  ( $i = 1, 2, 3$  – номер определенного вида ГГД) производилась оценка среднестатистического значения вероятности  $P_{cp}(\Phi)$  в пределах каждой из 48 исследуемых КГО. Кроме того, можно считать, что для вычисления вероятностей всех исследуемых видов ГГД ( $H_K$ ,  $Q$ ,  $s^*$ ) используют статистически независимые ГГД. При этом, выявление одного из статистических событий не изменяет вероятности появления других статистических событий по другому виду ГГД. Для статистически независимых событий были рассчитаны среднестатистического значения вероятности  $P_{cp}(\Phi)$  по формуле:

$$P_{cp}(\Phi_i) = [P_1(H_K) + P_2(Q) + P_3(s^*)] / 3, \quad (11)$$

где  $P(\Phi_i)$  вероятности, рассчитанные по соответствующим значениям ГГД в пределах месторасположения каждой КГО на территории Антарктиды.  $P_1(H_K)$  – значения вероятности, определяемое по данным ( $H_K$ ) мощности земной коры;  $P_2(Q)$  – значения вероятности, определяемое по данным значений аномалий теплового потока ( $Q$ );  $P_3(s^*)$  – значения вероятности, определяемое по данным ( $s^*$ ) площади КГО, нормированной на плотность подледниковых озер.

### Результаты исследований

Полученные статистические результаты были использованы автором для прогноза потенциальных углеводород-перспективных концентрических геоморфологических особенностей (КГО), расположенных на территории Антарктиды. Это дало возможность, с

небольшими финансово-экономическими затратами, выделить углеводород-перспективные области, проявляющиеся как в геоморфологических особенностях поверхности ледников и рельефа поверхности земной коры Антарктиды. Для прогноза углеводородной перспективности КГО на территории Антарктиды предлагается использовать элементы теории вероятности [18]. Используя информационно-вероятностную методику прогнозирования месторасположения углеводород-перспективных КГО, изложенную в [18], была рассчитана таблица вероятностей, используемых для выделения углеводород-перспективных КГО на территории Антарктиды (табл. 1).

Таблица 1. Таблица вероятностей, используемых для выделения углеводород-перспективных КГО на территории Антарктиды

$j$	Ин-дексКГО	Название КГО	$H_{\text{КМ}}$	$P_1(H_{\text{К}})\%$	$Q_{\text{КМ}}$	$P_2(Q)\%$	$2 \times r_{\text{КМ}}$	$n$	$s^*, \text{км}^2$	$P_3(s)\%$	$P_{\text{ср}}\%$
		<b>Восточн. Антарктида</b>									
1	1a	Квин-Модская	45	>1	45	4	555	0	242	-	2
2	1b	Мауд-Лэндская	45	>1	45	4	555	0	242	-	2
3	1c	Карпинская	45	>1	45	4	278	0	242	-	2
4	1d	Бельжикская	50	>1	75	<b>90</b>	333	<b>4</b>	22	<b>52</b>	<b>48</b>
5	1e	Домефская	45	>1	75	<b>90</b>	444	<b>6</b>	26	<b>44</b>	<b>45</b>
6	1f	Фаравейская	38	4	60	33	278	<b>12</b>	5	<b>87</b>	<b>41</b>
7	1g	Котсовская	45	>1	60	33	333	0	29	-	11
8	2a	Принц-Чарльзская	35	22	105	<b>99</b>	333	<b>3</b>	29	37	<b>52</b>
9	2b	Щунинская	35	22	45	4	333	1	87	2	9
10	2c	Кемпская	27	<b>99</b>	45	4	444	0	155	-	<b>35</b>
11	2d	Эндербиевская	38	4	90	<b>75</b>	666	<b>2</b>	174	>1	26
12	2f	Ламберт-Рифтская	27	<b>99</b>	105	<b>99</b>	222	0	38	-	<b>67</b>
13	3	Советская	45	>1	60	33	888	4	155	>1	11
14	4a	Короткевичская	35	22	60	33	999	3	241	>1	18
15	4b	Моусонская	33	<b>45</b>	105	<b>99</b>	444	1	155	>1	<b>49</b>
16	4c	Максимовская	27	<b>99</b>	90	<b>75</b>	389	0	119	-	<b>58</b>
17	5	Восточно-Озерская	40	2	60	33	555	<b>20</b>	12	<b>73</b>	<b>36</b>
18	6a	Гамбурцевская	40	2	15	>1	666	2	174	>1	1
19	6b	Александровская	40	2	60	33	444	<b>13</b>	11	<b>75</b>	<b>37</b>
20	7	Голицинская	27	<b>99</b>	90	<b>75</b>	777	2	237	>1	<b>58</b>
21	8a	Шмидтовская	35	22	60	33	999	5	156	>1	18
22	8b	Уилксовская	35	22	75	90	444	3	52	14	<b>41</b>
23	9a	Конкорд-Озерская	40	2	60	33	666	<b>38</b>	9	<b>79</b>	<b>38</b>
24	9b	Керк-Патрикская	35	22	60	33	444	<b>20</b>	8	<b>82</b>	<b>45</b>
25	10a	Аделиевская	27	99	45	4	333	2	44	19	<b>41</b>
26	10b	Шеклтонская	35	22	30	>1	333	<b>13</b>	7	<b>84</b>	<b>35</b>

26	10b	Шектопская	35	22	30	>1	666	16	22	52	24
27	10c	Георг-Лэндская	35	22	30	>1	666	16	22	52	24
28	16	Южно-Полюсная	40	2	60	33	555	18	13	71	35
29	21a	Бельгранская	35	22	30	>1	777	20	24	48	23
30	21b	Енсакольская	40	2	45	4	333	13	149	84	30
31	21c	Северо-Бельгранская	35	22	30	>1	388	4	30	35	19
32	21d	Западно-Бельгранская	30	88	75	90	222	0	39	-	59
		Средн. значения $P(\Phi_i)$		36		39				39	32
		<b>Запад. Антарктида</b>									
33	11a	Росса-Ледниковая	32	60	75	>1	777	2	75	79	46
34	11b	Сидли-Горская	33	45	105	99	555	1	241	13	53
35	11c	Терра-Бэрдская	35	22	105	99	444	1	155	43	55
36	11d	Эребусская	27	99	120	1	222	1	39	91	64
37	12	Мэри-Бэрдская	35	22	120	1	777	30	5	99	41
38	13	Бэрдская	38	5	105	99	444	1	155	43	49
39	14	Северо-Бэрдская	35	22	120	1	555	2	121	59	27
40	15	Амундсенская	30	88	105	99	333	1	84	76	88
41	17a	Сайплская	25	72	90	1	444	1	155	43	39
42	17b	Элсуортская	27	99	75	>1	777	2	237	14	38
43	18a	Беллинсгаузенская	35	22	105	99	999	0	783	-	41
44	19a	Северо-Уэддэлская	18	5	120	1	444	?	155	?	3
45	20a	Фильхнерская	27	99	90	1	555	?	241	?	51
46	20b	Ронневская	30	88	90	1	333	?	87	?	45
47	20c	Винсонская	30	88	75	>1	333	4	22	95	61
48	22a	Скоша-Лэндская	30	88	105	99	333	7	12	98	95
		Средн. значения $P(\Phi_i)$		58		38				63	50

### Выводы

В результате проведенных исследований впервые были определены географические координаты расположения, пространственные размеры (диаметры) и значения вероятностей для сорока восьми КГО на территории восточной (материковой) и западной (рифтогенной) частей Антарктиды. Проведенные исследования показали, что наиболее углеводород-перспективными КГО на территории Западной и Восточной Антарктиды являются КГО с аномально высокими значениями АТП. С геологической точки зрения, для поисково-разведочных исследований на территории Антарктиды они являются наиболее углеводород-перспективными КГО при должной оценке и других геофизических параметров. В результате проведенных расчетов также выяснилось, что для поисков месторождений ПУВ, которые частично возникают за счет дегазации и



дегидратации мантии Антарктиды в зонах мантийных плюмажей, углеводород-перспективными являются КГО, которые имеют высокие значения такого геофизического параметра ( $s^*$ ) как площадь КГО нормированная на плотность географического распределения подледниковых озер. Возможно, уже в настоящее время необходимо при закладке новых антарктических станций России выбирать наиболее углеводород-перспективные КГО для проведения детальных наземных геолого-геофизических исследований для поиска месторождений нефти и газа на территории Антарктиды. Из 32-х исследуемых КГО, расположенных в восточной (континентальной) части Антарктиды, пять КГО (Принц-Чарльзская, Ламберт-Рифская, Максимовская, Голицинская, Западно-Бельгранская) имели значение вероятности выше  $P_{cp} > 50\%$  (см. табл.). Другие 14 имели значение вероятности выше средней ( $P_{cp} > 32\%$ ) по этому региону. Автор предполагает, что 5 выше перечисленных КГО имеют высокие перспективы для открытия в пределах этих КГО месторождений углеводородов. Другие 14 исследуемых КГО должны быть исследованы более тщательно, так как могут быть УВ-перспективными только в отдельных районах. Еще более УВ-перспективными являются семь КГО (Сидли-Горская, Терра-Бэрдская, Эребусская, Амундсенская, Фильхнерская, Винсонская, Скоша-Лэндская) в западной части Антарктиды со значениями вероятности выше  $P_{cp} > 50\%$ .

### Благодарности

Автор статьи искренне благодарит докторов геолого-минералогических наук Тимурзиева А.И., Сейфуль-Мулюкова Р.Б., Сывороткина В.Л. - организаторов ежегодных Всероссийских конференций «Кудрявцевские чтения» за их огромную работу по организации этих конференций и за возможность проанализировать замечания, поступившие при изложении докладов и устранить их в рамках данной статьи.

### Библиография

1. Атлас космических снимков "Земля из космоса". Главное управление геодезии и картографии СССР. Государственный научно-исследовательский и производственный центр "Природа". 1985. 300 с.
2. Богоявленский И.В., Богоявленский В.И. Дегазация Земли. Формирование залежей углеводорода в верхней части разреза и кратеров выбросов газа // Деловой журнал "Neftegaz.Ru". 2021. № 1. С. 48-55.
3. Ботт М. Внутреннее строение Земли. М.: Мир, 1974. 373 с.
4. Васильчук Ю.К., Белик А.Д., Буданцева Н.А., Геннадиев А.Н., Васильчук А.К., Васильчук Дж.Ю., Завгородняя Ю.А., Гинзбург А.П., Блудушкина А.Б. Полициклические ароматические углеводороды и изотопы углерода в торфе миграционного бугра пучения (Большеземельская тундра) // Почвоведение. 2021. № 7. С. 797-805. DOI: 10.31857/S0032180X21070133 EDN: MZJTLF.
5. Деменицкая Р.М. Кора и мантия Земли. М.: Недра, 1975. 253 с.
6. Кац Я.Г., Полетаев А.И., Сулиди-Кондратьев Е.Д. Кольцевые структуры лика планеты. М.: Знание, 1989. 48 с.
7. Коган А.А. Глубинное сейсмическое зондирование земной коры в Восточной Антарктиде // Сб. "Антарктика", вып. 13. М.: Наука, 1974. С. 85-104.
8. Корякин Е.Д. Строение земной коры моря и дуги Скоша по геофизическим данным // Сб. "Антарктика", вып. 12. М.: Наука, 1973. С. 30-57.
9. Кузякин Л.П., Белова Н.Г., Васильчук Ю.К. и др. Метан в пластовых льдах Восточной Камчатки, как индикатор их генезиса // Лед и снег. 2024. Т. 64. № 3. С. 447-463. DOI: 10.31857/S2076673424030106 EDN: INGZDK.
10. Равич М.Г., Каменев Е.Н. Кристаллический фундамент Антарктической платформы.

Л.: Гидрометеиздат, 1972. 150 с.

11. Строев П.А. Мощность и некоторые черты строения земной коры в Южном океане и в прибрежной зоне Антарктиды // Сб. "Антарктика", вып. 12. М.: Наука, 1973. С. 42-59.

12. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация Земли и глобальные катастрофы. М.: Геоинформцентр, 2002. 250 с.

13. Тектоническая карта Антарктиды. Масштаб 1:40 000 000. Под ред. Равич М.Г., Грикуров Г.Э. Л.: НИИГА, 1976. 1 л.

14. Тимурзиев А.И. Миф "энергетического голода" от Хабберта и пути воспроизводства ресурсной базы России на основе реализации проекта "Глубинная нефть" // Бурение и нефть. 2019. № 1. С. 12-20. EDN: YZHFNJ.

15. Фролов А.И., Строев П.А., Корякин Е.Д. Гравитационное поле и строение земной коры земли Уилкса и земли Виктории (Восточная Антарктида) // Сб. "Морские гравиметрические исследования", вып. 6. М.: МГУ, 1970. С. 104-113.

16. Харитонов А.Л. Прогнозирование углеводородоперспективных структур кольцевого вида в Баренцевоморском регионе по результатам применения стохастического метода при использовании совокупности геопараметров // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 24. № 2. С. 130-137. DOI: 10.18500/1819-7663-2024-24-2-130-138 EDN: ORAMII.

17. Харитонов А.Л., Харитонova Г.П., Трюонг К.Х. Сопоставление спутниковых геомагнитных данных с наземным измерением концентрации радона для выявления предвестников землетрясений (на примере Калифорнийского сейсмоактивного района) // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. 2009. № 13. С. 170-177. EDN: KTZTBF.

18. Bendat J.S., Pierol A.G. Random data: analysis and measurement procedures. New York: Wiley-Interscience, 1972. 464 p.

19. Bentley C.R. Crustal structure of Antarctic // Tectonophysic. 1973. Vol. 20. N 1-4. P. 229-240.

20. Ebbing J. и др. Earth tectonics as seen by GOCE - enhanced satellite gravity gradient imaging // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. N 1. P. DOI: 10.1038/s41598-018-34733-9 EDN: AWYWZM.

21. Henricson S.W. National Geodetic Satellite Program. NASA, 1977.

22. IHFC. Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission, 2012.

23. Langel R.A. и др. MAGSAT data processing: a report for investigators // Technical memorandum 82160: NASA, 1981. 329 p.

24. LANDSAT.usgp.gov/documents/DFCB\_Vol\_IV.L.pdf. Ebook LANDSAT 7 SYSTEM.

25. Li L., Aitken A.R.A. Crustal heterogeneity of Antarctica signals spatially variable radiogenic heat production // Geophysical Research Letter. 2024. Vol. 51. N 2. DOI: 10.1029/2023GL106201 EDN: EFIPQI.

26. Lloyd A.J. и др. Seismic structure of the Antarctic upper mantle imaged with adjoint tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. Vol. 125. N 3. DOI: 10.1029/2019JB017823 EDN: UZPPQH.

27. Reading A.M. и др. Antarctic geothermal heat flow and its implications for tectonics and ice sheets // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. N 12. P. 814-831. DOI: 10.1038/s43017-022-00348-y EDN: PSPYLZ.

28. Risk G.F., Hochstein M.P. Heat flow at arrival heights, Ross Island, Antarctica, New Zealand // Journal of Glaciology. 1974. Vol. 46. N 155. P. 665-674. <https://doi.org/10.3189/172756500781832701>.

29. Seroussi H. и др. InitMIP-Antarctica: an ice sheet model initialization experiment of ISMIP6 // The cryosphere. 2019. N 13. P. 1441-1471. DOI: 10.5194/tc-13-1441-2019 EDN: XNQGDK.

30. Shen W. и др. A geothermal heat flux map of Antarctica empirically constrained by seismic structure // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. N 14. DOI:

10.1029/2020GL086955 EDN: LOUZMC.

31. Steinberger B., Steinberger A. Mantle plumes and their interactions // Dynamics of Plate Tectonics and mantle convection. 2023. P. 407-426. DOI: 10.1016/B978-0-323-85733-8.00021-4.

## Результаты процедуры рецензирования статьи

*В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.*

*Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).*

Предметом исследования является изучение углеводород-перспективных областей Антарктики по геофизическим данным, измеренным в пределах концентрических геоморфологических особенностей земной коры и ледникового покрова.

Тема исследований актуальна. Территория Антарктики остается одним из самых больших по занимаемой площади, но слабоизученных континентов южного полушария Земли. По прогнозам некоторых экспертов недра Антарктики содержат огромное количество разнообразных природных ресурсов. Однако, глубинное строение земной коры на территории Антарктиды долгое время оставалось слабоизученным с помощью наземных геолого-геофизических методов из-за суровых погодных условий и сложностей исследования земной коры из-за мощного слоя ледников, покрывающих большую часть этого континента. Все это до последнего времени не позволяло найти месторождения полезных ископаемых на территории Антарктиды. Зоны повышенного теплового потока и наличие впадин в рельефе кристаллического фундамента часто создают концентрические геоморфологические особенности (КГО) в виде ледниковых концентрических депрессий. Эти локальные КГО возникли в результате таяния слоев вечной мерзлоты, вследствие общего повышения средней по планете температуры приземной атмосферы. КГО по своей геоморфологической структуре очень похожи на локальные, связанные с выбросами газообразных углеводородов. В связи с этим, изучение данного вопроса весьма актуально.

Методология исследования основана на применении основных геофизических методов (гравиразведка, космомагниторазведка, геотермия, сейсморазведка), так и вспомогательных геоморфологических методов (спутниковые геодезические методы определения высот рельефа ледниковой и подледниковой поверхности, а также спутниковые радарные методы просвечивания ледникового покрова).

Научная новизна исследований в статье заключается в том, что впервые сделана попытка с помощью спутниковых геофизических съемок изучить глубинное строение Антарктиды, скрытое под мощным 4-х километровым ледниковым покровом. Оптические спутниковые космофотосъемки позволили выделить крупные (диаметром 200-1000 км) концентрические геоморфологические особенности, наблюдаемые в рельефе ледникового покрова Антарктиды. По данным сейсмотомографии автором были выделены новые КГО: Щунинская, Уилксовская, Восточно-Озерская, Беллинсгаузенская, сформировавшиеся в разрезе земной коры Антарктиды и морей, расположенных вокруг Антарктиды.

Стиль статьи – научный. Научный материал обогащен достаточным количеством расчетных данных, иллюстрирован картографическим материалом. Объем статьи выдержан. Структура статьи соответствует требованиям журнала. По мнению рецензента, расчетные данные приведенные в разделе "Методика исследований" вполне можно отнести в раздел "Результаты исследований". Также необходимо озаглавить таблицу 1,

представленную в тексте.

В результате проведенных исследований, автором установлено, что среднее значение вертикальной мощности земной коры (Нк) в восточной (платформенной) части Антарктиды составляет около 40 км, а в ее западной (палеорифтовой) части около 30 км. Но в восточной части Антарктиды имеются определенные области, где мощность земной коры не превышает 30 км. Аналогичные области с небольшой мощностью земной коры характерны для нефтегазоносных областей Западной Сибири и Ямала. Автором доказано, что на территории Антарктиды, существует несколько КГО с высокими и очень высокими значениями плотности распределения подледниковых озер. Полученные статистические результаты были использованы автором для прогноза потенциальных углеводород-перспективных концентрических геоморфологических особенностей, расположенных на территории Антарктиды. Это дало возможность выделить углеводород-перспективные области поверхности земной коры Антарктиды.

Библиография статьи включает в себя 31 литературный источник, в том числе 14 - на иностранном языке. Апелляция к оппонентам представлена в ссылках на библиографические источники.

Выводы в статье обоснованы и отражают результаты проведенных исследований. Автором установлено, что углеводород-перспективных являются семь КГО: Сидли-Горская, Терра-Бэрдская, Эребусская, Амундсенская, Фильхнерская, Винсонская и Скоша-Лэндская в западной части Антарктиды со значениями вероятности выше  $P_{ср} > 50\%$ . Исходя из теоретических предпосылок, чем больше на территории Антарктиды будет найдено источников гидротермальной или газотермальной (дегазационной) деятельности недр, тем выше вероятность нахождения в этих КГО залежей углеводородов. Автором выявлены крупные линзы жидкости (подледниковые озера), которые могут содержать в составе подледниковой озерной жидкости значительное количество жидких углеводородов или природного газоконденсата.

Данная статья будет полезна широкому кругу ученых и может быть опубликована в журнале «Арктика и Антарктика». Существенных замечаний по статье не отмечено.