

## **Применение преобразованных мелкомасштабных цифровых моделей рельефа для геолого-структурного районирования крупных блоков земной коры.**

О. В. Рыбас ([o\\_rybas@itig.as.khb.ru](mailto:o_rybas@itig.as.khb.ru)), Г. З. Гильманова ([gigulya@yandex.ru](mailto:gigulya@yandex.ru)),

М. В. Горошко ([goroshko@itig.as.khb.ru](mailto:goroshko@itig.as.khb.ru))

Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН,  
г.Хабаровск, Ким-Ю-Чена 65

### **Аннотация**

Приводятся методика обработки цифровой модели рельефа *Модулем градиента* и *Лапласианом на поверхности Гаусса* направленная на выделение наиболее существенных особенностей изображения, и результаты ее применения для геолого-структурного районирования. Исследуемая область (52-61° с.ш и 120-133° в.д.) охватывает южную часть Сибирской платформы (Алдано-Становой щит), юго-восточный фланг каледонского Селенга-Станового и западную часть индосинийского Монголо-Охотского орогенных поясов. Показано, что интерпретация преобразованных цифровых моделей позволяет значительно более точно устанавливать размеры и взаимоотношения геологических структур и зон различных типов, выявлять разрывные нарушения, тектонические блоки разной степени переработки.

### **Введение**

Рельеф является одним из основных показателей хода и направленности процессов, протекающих в приповерхностном слое Земли. Будучи результатом взаимодействия экзогенных и эндогенных процессов, рельеф отражает геологическое строение территории.

В настоящее время в геологических и тектонических исследованиях активно применяется широкий комплекс аэрокосмических съемок и измерений в разных диапазонах спектра. Они могут быть получены как пассивными методами, использующими естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов на поверхности Земли, обусловленное солнечной активностью, так и активными, использующими вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия.

Методы получения космической информации постоянно совершенствуются, как и способы ее преобразования и компьютерной обработки, позволяющие повысить возможности визуального дешифрирования, генерализации изображения с целью выделения отдельных классов объектов. В данной работе излагаются методика и результаты обработки цифровых моделей *Модулем градиента* и *Лапласианом на поверхности Гаусса* для изучения особенностей строения очень интересного и сложного в тектоническом отношении района взаимодействия Евразийской и Амурской плит. Исследуемая область (52-61° с.ш и 120-133° в.д.) охватывает южную часть Сибирской платформы (Алдано-Становой щит), северо-восточные фрагменты каледонского Селенга-Станового складчатого пояса, Аргуно-Мамынский микроконтинент и западную часть позднегерцинской-индосинийской Монголо-Охотской складчатой системы. Область характеризуется активными геодинамическими проявлениями, как в настоящее время, так и в геологическом прошлом.

### **Геолого-тектоническая характеристика района исследований.**

Исследованная территория охватывает три крупнейших геоблока Дальневосточного региона: докембрийскую Сибирскую платформу, Селенга-Становой каледонский орогенный пояс и Монголо-Охотский раннемезозойский орогенный пояс и. Они разделены Джелтулакским и Северотукурингским глубинными разломами [1-8].

В составе Сибирской платформы выделяются Алдано-Становой щит и неопротерозойский- кембрийский плитный комплекс

Алдано-Становой щит сложен, в основном, гранулитовыми, амфиболитовыми и, в меньшей степени, зеленосланцевыми метаморфическими комплексами. Традиционно, к наиболее древним архейскими образованиям относятся комплексы гранулитовой и амфиболитовой фаций регионального метаморфизма, к позднеархейским – менее измененные комплексы амфиболитовой фации, к палеопротерозойским – породы зеленокаменной фации. Но современные изотопно-геохронологические данные показывают, что гранулитовый метаморфизм преимущественно имел место в палеопротерозойское время, а относительно слабометаморфизованные гранит-зеленокаменные образования имеют позднеархейский возраст [1,8,9].

Алдано-Становой щит расчленяется на три мегаблока (террейна): Алданскую гранулит-гнейсовую, Становую и Олекминскую гранит-зеленокаменные области. Граница Алданской гранулит-гнейсовой и Становой гранит-зеленокаменной областей проходит по зоне крупного долгоживущего глубинного Станового разлома, а с Олекминской гранит-зеленокаменной областью - по Амгинскому глубинному разлому.

В более детальном плане, исходя из особенностей геологического развития, магматизма, метаморфизма и специфики глубинного строения в Алдано-Становом щите выделяются блоки второго порядка.

*Алданская область* состоит из мозаики блоков, разделенных позднеархейско-раннепротерозойскими глубинными разломами. Различают блоки, сложенные курультинским, иенгским и тимптоно-желтулинским структурно-вещественными комплексами.

Курультинский комплекс сложен двупироксеновыми гнейсами и сланцами, пириболитами, плагиогнейсами, гранатовыми гнейсами и линзами ультраосновных сланцев и кварцитов. В разрезе иенгского комплекса находится значительный объем мафических пород и почти всегда присутствуют кварциты, в том числе железистые. Тимптоно-Джелтулинский вещественно-структурный комплекс характеризуется пестрым составом разрезов, наличием карбонатных пород при почти полном отсутствии кварцитов. Интрузивные породы этих комплексов представлены мелкими линзовидными телами метагипербазитов и продуктами гранитизации, в том числе чарнокитами.

Курультинским структурно-вещественным комплексом сложены Курультинский и Зверевский блоки, иенгским комплексом - Нимнырский, Иенгский, Сутамский, Сеймский, Верхнетимптонский блоки, а тимптоно-желтулинским комплексом - Суннагинский, Гонамский, Иджекский и Тимптонский блоки.

Отложения плитного комплекса представлены юдомской серией неопротерозоя,

имеющей мощность 95-300 м, и образованиями кембрия мощностью 72-213 м. Отложению юдомской серии предшествовал наиболее крупный перерыв в осадконакоплении, сопровождавшийся, на фоне общей инверсии, становлением ультраосновных щелочных интрузий. В основании серии залегают песчаники (в том числе кварцевые) и конгломераты, которые вверх по разрезу сменяются аргиллитами, доломитами, доломитистыми известняками и алевролитами. Кембрийские отложения сложены цветными известняками и доломитами, глинистыми битуминозными известняками, переслаивающимися с кремнистыми известняками и мергелями. Породы неопротерозойского-кембрийского плитного комплекса выполняют широкие пологие мульды и узкие, приразломные синклинальные складки с глубиной погружения фундамента не более 300 м.

В *Алданской гранулит-гнейсовой области* выделяются наложенные структуры позднеархейского, палеопротерозойского и позднемезозойского возраста. К позднеархейскому времени заложения относятся Федоровский и Унгринский грабен-синклиории, сложенные федоровским структурно-вещественным комплексом, представленным разнообразными гнейсами и кварцитами, находящихся в тонком переслаивании с диопсидовыми сланцами и амфиболитами.

Нижнепротерозойские комплексы осадочных пород выполняют два небольших наложенных на кристаллическое основание узких грабена: Атугей-Нуямский и Давангра-Хугдинский, сложенных породами поярковской серии, представленных кварцитовидными и кварц-полевошпатовыми песчаниками, алевролитами, глинистыми сланцами, гравелитами и конгломератами.

Позднемезозойские терригенные угленосные отложения слагают Куранахскую, Верхнегынымскую, Чульманскую, Токариканскую, Гувилгринскую, Гонамо-Нуямскую, Ытымжинскую и Токинскую континентальные рифтогенные впадины. Они выполнены юрскими существенно терригенно-угленосными отложениями суммарной мощностью до 3500-4500 м. Максимальная мощность отложений фиксируется у южных бортов впадин. Залегают они несогласно с разрывом на архейско-протерозойских комплексах кристаллического фундамента и неопротерозойско-кембрийских породах Сибирской платформы.

Все впадины бассейна представляют собой полуграбены с крутыми приразломными бортами, усложненными надвигами архейских пород на юго-западе и пологими на северо-востоке. Цепочка их ориентирована субширотно, согласно ориентировке окраины Алданской гранулит-гнейсовой области.

**Ареалы позднемезозойского магматизма** Алданской гранулит-гнейсовой области относятся к ряду субщелочных и щелочных формаций, находящихся в закономерных вещественных и пространственно-временных отношениях. Магматизм проявился в раннеюрском- меловом временном интервале в несколько этапов. Наибольшие объемы магматических масс были сформированы в поздней юре – раннем неокоме.

Выделены Центрально-Алданский ареал субщелочных и щелочных пород размером около 100-120 км в поперечнике, расположенный на границе Алданской гранулит-гнейсовой области с Алдано-Ленской плитой, Тыркандинский ареал субщелочных и щелочных пород размером до 50 км в поперечнике, расположенный в

зоне Тыркандинского разлома и Ломамский ареал субщелочных и щелочных пород размером 75×25 км расположенный в северном борту Ытымджинской юрской впадины.

Характерной особенностью тектоники Становой гранит-зеленокаменной области является наличие крупных глыб (блоков) раннеархейского основания среди позднеархейского (собственно станового) складчатого комплекса. Последние, по сравнению с образованиями раннего архея, обладают меньшими мощностями, обычно представлены толщами груборитмичного чередования базитовых и высокоглиноземистых гнейсов и кристаллических сланцев с прослоями кварцитов и мраморов. Уровень их метаморфизма – амфиболитовый.

К раннеархейским отнесены Ларбинский, Дамбукинский и Брянтинский блоки, к позднеархейским- Джелтулакский, Иликанский, Чимчанский, Мульмульгинский и Купуринский блоки.

Из наложенных структур в Становой гранит-зеленокаменной области выделяется Джелтулакский шовный прогиб и позднемезозойский Становой вулканоплутонический пояс.

Джелтулакский прогиб представляет собой узкий (5-15 км) синклинорий длиной 120 км, испытавший позже интенсивную разломную тектонику и гранитообразование, местами уничтоживших значительную часть структуры. В строении прогиба принимают участие раннепротерозойские породы желтулакской серии, выходы которой на современном этапе приурочены большей частью к зонам разломов. Они залегают в небольших тектонических клиньях среди пород архея, интенсивно дислоцированы и прогрессивно метаморфизованы от зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фаций регионального метаморфизма. Вулканогенно-осадочные отложения желтулакской серии подразделяются на две толщи: нижнюю (1100м) – кварцитов, кварцито-сланцев, слюдяных (со ставролитом, андалузитом, дистеном, гранатом), углисто-графитистых и зеленых (со стильпномеланом) сланцев, мраморов, метаконгломератов, метаэффузивов, и верхнюю (1200 м) – филлитов, кварцито-сланцев, метапесчаников, метаалевролитов, метаконгломератов и метаэффузивов.

Становой вулканоплутонический пояс близширотного простирания расположен в северной части Становой гранит-зеленокаменной области. Он протягивается вдоль Станового разлома от берега Охотского моря в бассейн р. Нюкжа на расстояние свыше 1200км. Породы пояса слагают мелкие вулканические поля кислых и средних эффузивов и крупные (до 3-4 тыс. км<sup>2</sup>) гранитоидные многофазные массивы сложной плито- и лакколитообразной формы [5-7].

Складчатые пояса представлены каледонским Селенга-Становым и индосинийским Монголо-Охотским

Селенга-Становой каледонский пояс сложен преимущественно интрузивными породами с небольшими блоками нижнеархейских биотит-роговообманковых, роговообманковых, биотитовых сланцев и гнейсов, силлиманитовых, кианитовых, двуслюдяных гнейсов, кварцитов, диопсидовых пород и кальцифиров. Интрузивные массивы представлены габбро, габбро-амфиболитами, пироксенитами архейского возраста, гранитами и гранодиоритами архея и раннего протерозоя, лейкогранитами юры, граносиенитами перми и триаса.

Монголо-Охотский орогенный пояс раннемезозойской (индосинийской)

складчатости в полосе профиля 3ДВ представляет собой шовную коллизионную структуру в южном обрамлении Сибирской платформы, ограниченную с севера Северо-Тукурингским, а с юга - Южно-Тукурингским глубинными разломами. В полосе профиля пояс сложен мощными комплексами неопротерозойских-палеозойских кремнисто-вулканогенно-терригенных пород, зонально-метаморфизованными в фации глаукофановых и зеленых сланцев. Эти отложения чрезвычайно сложно дислоцированы и характеризуются выдержанным по простиранию линейным характером складок с преобладающим северным падением пластов.

### **Методика обработки цифровых моделей рельефа.**

#### Исходный материал

Исходным материалом для исследований и обработки послужили две цифровые модели рельефа: SRTM03 и SRTM30\_Plus (рис1.).

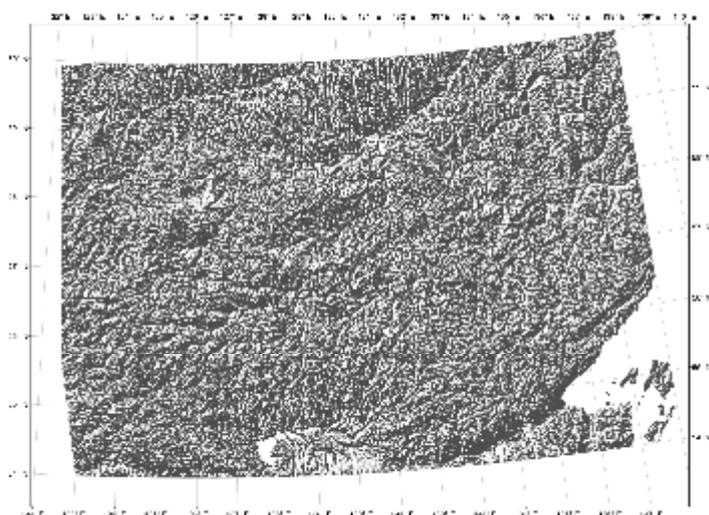


Рис.1 Цифровая модель рельефа юго-востока Сибирской платформы SRTM03 и SRTM30\_Plus

Распространяемые данные SRTM03 имеют следующие характеристики: размер ячейки 3x3 арксекунды (примерно 90м), проекция Lat/Lon на эллипсоиде WGS84 (World Geodetic System 1984) с исходной отметкой над уровнем моря определяемой геоидом WGS84-EGM96 (Earth Gravitational Model). Абсолютные погрешности горизонтального позиционирования и высоты для евразийского континента составляют 8.8м и 6.2м соответственно. Данные кодируются 16 битами, что позволяет представлять весь набор высот от 0м до 65535м с дискретностью 1м.

SRTM30\_PLUS - 30-секундный DEM, который включает в себя не только высоты, но и глубины (батиметрия). Ячейка 30 арксекунд соответствует ~900м, дискретность по высоте/глубине - 1 метр. SRTM30 можно рассматривать как продолжение и усовершенствование проекта GTOPO30, т.к. SRTM03 ограничен 60 градусами, недостающие данные были взяты из GTOPO30. Батиметрия, приполярные зоны, горные массивы (наземные и морские) и многие другие уточняющие данные были взяты из различных источников [10,11]. Обработка и последующей визуализация изображений проводилась с применением оригинальных программ и программной среды ArcGis 9.3.

Рассмотрим растровую модель поверхности рельефа как 3-мерный объект в системе координат растрового изображения  $(x,y)$ , и значения в каждой точке  $f(x,y)$  являются численными значениями реальных высот поверхности над уровнем моря в метрах. Т.к. исходное изображение имеет полную информацию о привязке и системе координат, на этапе обработки нет необходимости в отслеживании информации о географической привязке, она будет возвращена на финальном шаге для дальнейшей работы в ГИС приложениях. Таким образом, мы будем понимать значение высоты  $f$  в метрах в ячейке растра  $(x,y)$ , для упрощения записи и привязки к общепринятым обозначениям.

Функция Гаусса и Масштабное Пространство (Scale-Space).

В 1983 году Эндрю Виткиным (Witkin, 1983) [20] был предложен метод обработки 1-мерных сигнальных последовательностей функциями Гаусса и введен термин "Масштабное Пространство", и год спустя Кендеринк (Koenderink, 1984) [12] показал справедливость этого метода для 2-мерного случая, в частности, для обработки растровых изображений. Следующим шагом было определение оператора "ядра производной Гаусса" и мультимасштабного представления, основанное на Гауссовых производных, которое было предложено Кендоринком и ван Доорном (Koenderink and van Doorn (1987)) в качестве возможной модели для первичной обработки видеоинформации. Сегодня теория масштабных пространств является одной из базовых для построения более широкой теории компьютерного зрения, но благодаря своей проработанности и простоте реализации она находит применение и в смежных областях знания, в частности, в этой работе рассматривается методика выделения структуры рельефа по данным радарной съемки дистанционного зондирования.

Не вдаваясь в математические подробности, рассмотрим основные положения теории масштабных пространств. Базовая идея заключается в использовании функции Гаусса в качестве оператора ядра свертки для исследуемого сигнала. Определим функцию Гаусса на плоскости как

$$g(x,y;t) = \frac{1}{2\pi t} e^{-\frac{x^2+y^2}{2t}}, t > 0,$$

где  $t$  параметр масштаба, тогда результат свертки  $L(x,y;t) = (g \otimes f)(x,y;t)$  будем называть масштабным представлением поверхности  $f(x,y)$  с коэффициентом масштаба  $t$ .

Еще одно важное определение. Под масштабным пространством будем понимать множество  $\{g(\cdot;t), t>0\}$  с заданной операцией свертки  $\otimes$ , которое обладает свойством коммутативной полугруппы [12-21]. Откуда следует, что каждый элемент масштабного представления  $L(x,y;t_2)$  получается двумя путями: или сверткой ядра  $g(x,y;t_2-t_1)$  по отношению к предыдущему преобразованию  $g(x,y;t_1)$ , или прямой сверткой  $g(x,y;t_2)$  по отношению к функции  $f(x,y)$ . Это дает свободу выбора при построении фильтров различных масштабов и позволяет контролировать величину масштаба конечного результата в ходе последовательных (комплексных) преобразований.

Одним из важнейших свойств Гауссовых мультимасштабных представлений, ради которого и была создана теория масштабных пространств, заключается в неспособности генерировать ложные структуры в процессе операции сглаживания от

тонких форм к грубым. Т.е. при увеличении масштабного параметра  $t$  количество экстремумов на результирующей поверхности монотонно уменьшается (не увеличивается), при этом не генерируются новые. Более того, функция Гаусса является единственной функцией сглаживания обладающая такими свойствами [12,16,18,19].

Итак, геометрический смысл свертки поверхности  $f(x,y)$  с ядром Гаусса – это сглаживание поверхности с определенным параметром масштаба  $t$ . При этом величина  $t$  связана с результатом операции  $L(x,y;t)$  таким образом, что из исходного изображения удаляются все детали, чьи линейные размеры не превышают величин  $\sqrt{t}$ , т.е. термин "масштаб" следует понимать в контексте точности представленной информации. Это позволяет, с одной стороны, избавиться от шумов исходного материала (или хотя бы существенно их ослабить), и с другой – произвести его генерализацию, т.е. оставить элементы рельефа такой линейной размерности, которая необходима на текущем этапе обработки.

Для любого фиксированного значения  $t$  существуют частные производные, которые так же обладают свойством коммутативности. Т.е. производная любого порядка по каждой из переменных может быть получена тремя путями: (i) дифференцированием сглаженной поверхности  $L(x,y;t)$ , (ii) сверткой поверхности  $f(x,y)$  с дифференцированным ядром Гаусса, (iii) сглаживанием дифференцированной поверхности  $f(x,y)$ . Кроме того, производная Гауссова масштабного пространства ( $\{g(\cdot;t)\}$ ,  $\otimes$ ) также является полугруппой, следовательно, производная мультимасштабного представления наследует свойства каскадного сглаживания [13], что позволяет не заботиться о порядке дифференцирования в случае частных производных высоких порядков.

Частная производная по каждой из переменных для поверхности рельефа - это характеристика изменения высот по соответствующим направлениям. Для краткости запишем их  $L_x$  и  $L_y$ , тогда вектор  $(L_x, L_y)^T$  – это градиент функции  $L(x,y;t)$ , который указывает направление наискорейшего роста функции в каждой точке  $(x,y)$  и чей модуль равен скорости ее изменения в этом направлении. Таким образом, градиент характеризует состояние поверхности, как по крутизне, так и по направлению склона (азимуту).

Частные производные второго порядка обозначим  $L_{xx}$ ,  $L_{yy}$  и  $L_{xy}$ . Существует достаточно большой набор методов для анализа структуры сигнала основанных на них, но для наших целей воспользуемся только одним – оператором Лапласа. Тогда поверхность построенная им будет представлять из себя сумму двух частных производных  $\nabla^2 L = L_{xx} + L_{yy}$ .

Необходимость использования мультимасштабного представления определяется тем, что для объектов реального мира не существует такого универсального масштаба, когда можно было бы выделить все элементы структуры в течение единственной серии преобразований. Чаще всего тонкие и точные особенности лучше проявляются при малых значениях сглаживающего параметра масштаба  $t$ , при этом теряются грубые формы. При увеличении  $t$  происходит генерализация обрабатываемой поверхности  $f(x,y)$  с потерей детальности, но появляется возможность проявить более грубые структурные составляющие. Таким образом, произведя серию обработок поверхности

$f(x,y)$  (это может быть модуль градиента, Лапласиан на поверхности Гаусса, любое другое преобразование) с различной степенью генерализации, будет получена серия результатов, которая может быть в свою очередь использована для дальнейшей обработки в аналитических системах (линеаменты, текстуры, etc). Например, выделяя линеаменты из модуля градиента фиксированного параметра сглаживания  $t$ , мы всегда можем знать характеристики необходимые на данном этапе обработки объектов и отфильтровывать ненужные. Прделав эти операции для каждого из уровней генерализации, на последнем шаге можно объединить все выделенные линеаменты для получения общей картины.

### Выделение структуры рельефа

В геоморфологических исследованиях задача сводится к выделению линейных, кольцевых структур, и, в качестве самостоятельного объекта - текстур, с ярко выраженными морфометрическими признаками (осадочные бассейны, горные массивы, и т.д.), которые могут быть предметом, как дальнейшей автоматической обработки, так и визуальной оценки.

Модуль градиента является наиболее эффективным инструментом для выделения линейных структур, т.к. в зонах разрывных нарушений почти всегда присутствуют пространственно вытянутые участки с близкими значениями градиентов. Кроме того, в любой точке экстремума значение модуля градиента близко к нулю, что позволяет в результате отчетливо выделять долины и хребты в виде протяженных линейных объектов.

Для выделения объектов куполообразной формы (blob detection) используется оператор Лапласа. Фильтр, построенный на базе поверхности Гаусса с применением к ней этого оператора, называют "Лапласианом поверхности Гаусса" (Laplacian-of-a-Gaussian – LOG). Результатом работы фильтра будет максимальная ответная реакция на объекты куполообразной формы (отдельно стоящие пики, горные хребты), чьи очертания максимально близко соответствуют форме ядра свертки LOG, и минимальное — на объекты противоположной формы (депрессии, долины). Другими словами, поверхность  $\nabla^2 L = L_{xx} + L_{yy}$  является индикатором пиков/депрессий, чьи линейные размеры находятся в зависимости от масштабного параметра сглаживания  $t$ . На практике это преобразование используется для выделения кольцевых структур и для текстурного анализа.

### **Методика дешифрирования**

С целью выделения крупных структурных элементов и выяснения деталей их геологического строения исследуемой территории использовались два изображения, полученные при обработке цифровой модели рельефа модулем градиента рельефа (при  $t=1,16,64$ ) и Лапласианом на поверхности Гаусса (при  $t=4$ ). Цветное изображение в формате RGB синтезировано как комбинация результатов расчетов при разных значениях  $t$ . Первое изображение было получено в результате расчета модуля градиента рельефа при  $t=1,16,64$  (каналы R,G,B соответственно) для выявления максимального количества разрывных нарушений, а второе как сочетание результатов расчета модулей градиентов рельефа при  $t=1,16$  (каналы R,G ) и Лапласиана на поверхности Гаусса при

$t=4$  (канал В) для подчеркивания текстур. Добавление цветовой информации оказалось особенно важным при использовании результатов расчетов Лапласианом на поверхности Гаусса. Как уже было сказано в методической части, модуль градиента рельефа увеличивает зрительно степень расчлененности рельефа (рис.2). Этот показатель отражается на преобразованном снимке различными тонами серого цвета. Наименее расчлененные участки (блоки) изображаются черным и темно-серым цветами, наиболее расчлененные различными тонами серого и светло-серого цветов.

Лапласиан на поверхности Гаусса позволяет выявлять неявные и не всегда очевидные линейные и кольцевые структуры. Как уже было сказано, в качестве самостоятельного объекта можно рассматривать текстуры, т.е. в результате обработки выделяются зоны с ярко выраженными морфометрическими признаками (осадочные бассейны, горные массивы, и т.д.), которые могут быть предметом, как дальнейшей автоматической обработки, так и визуальной оценки.

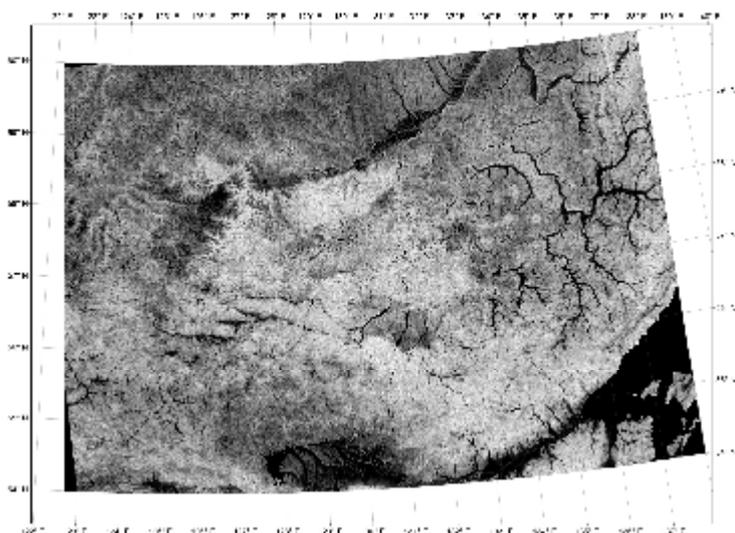
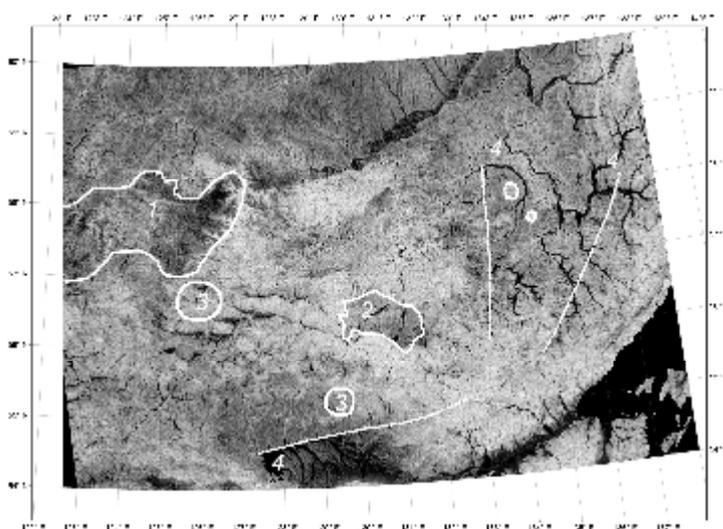


Рис.2 Цифровая модель рельефа юго-востока Сибирской платформы, обработанная Модулем градиента рельефа

Текстура рисунка участков местности в большой степени зависит от литологии развитых пород [22]. Перистый рисунок отвечает горизонтально залегающим платформенным образованиям, пятнистый - полям распространения осадочных и метаморфических толщ, интродуцированных интрузиями, бугристый-сближенным вулканическим центрам, петельчатый- слоистым толщам и т.д (рис.3).

Рис.3 Пример выделения геологических объектов по цифровой модели рельефа, обработанной Модулем градиента рельефа. Цифрами обозначены: 1-Нимныро-Чугинский блок архейского фундамента; 2-юрские угленосные отложения; 3-кольцевые структуры; 4-разломы.



Текстурные особенности могут служить индикатором состава пород и крупных литолого-петрографических комплексов. Характер границ отдельных типов рельефа указывает на взаимоотношения различных толщ (контакт нормальный стратиграфический или тектонический)(рис 4).

Полосовые линейные аномалии отождествляются обычно с линейными телами (дайками) интрузивных пород, устойчивыми к выветриванию, крутопадающими пластами осадков, разломами различного направления. Кольцевые аномалии отвечают малым интрузиям, вулcano-тектоническим депрессиям, интрузивно-купольным структурам. Элементы гидросети позволяют установить наиболее крупные региональные геологические объекты: разломы, складчатые структуры, основные литолого-петрографические комплексы.

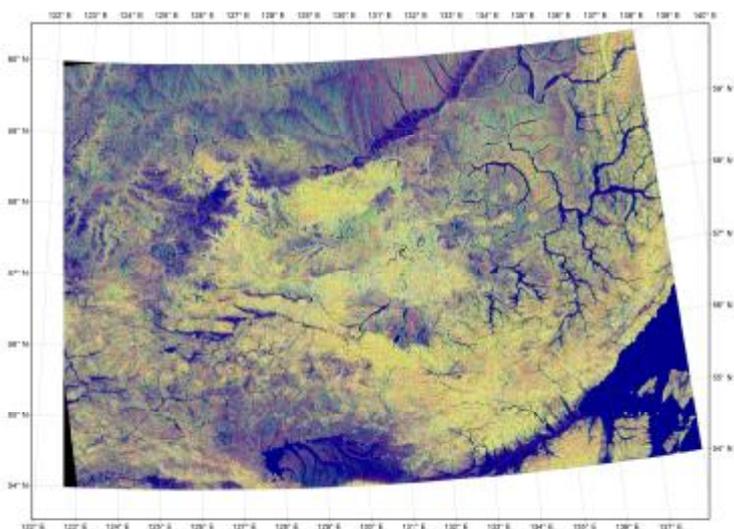


Рис.4 Цифровая модель рельефа юго-востока Сибирской платформы, обработанная Лапласианом на поверхности Гаусса.

## Результаты работ

Чтобы не перегружать изображение, результаты дешифрирования преобразованных снимков были представлены отдельным рисунком 5 - тектонической схемой.

По данным анализа преобразованных цифровых моделей рельефа уверенно, различной тональностью и текстурой рельефа местности выделяются Алдано-Становой щит, Монголо-Охотский и Селенга-Становой орогенные пояса, границы которых проводятся по Северо-Тукурингскому и Джелтулакскому глубинным разломам. Эти разломы на снимках дешифрируются как границы блоков с различными тонами серого цвета и различной текстурой рельефа.

В Алдано-Становом щите выделяются Алданская гранулит-гнейсовая и Становая гранит-зеленокаменная области. Граница между ними проходит по Становому глубинному разлому (рис.4)

Метаморфические архейские толщи Алданской гранулит-гнейсовой области по степени контрастности рельефа Тимптонским глубинным разломом четко разделяются на две части: западную и восточную. Западная часть области, объединяющая Курультинский, Нимнырский и Федоровский блоки, отличается от восточной слабой контрастностью рельефа (темносерым фоном) по сравнению с восточной более

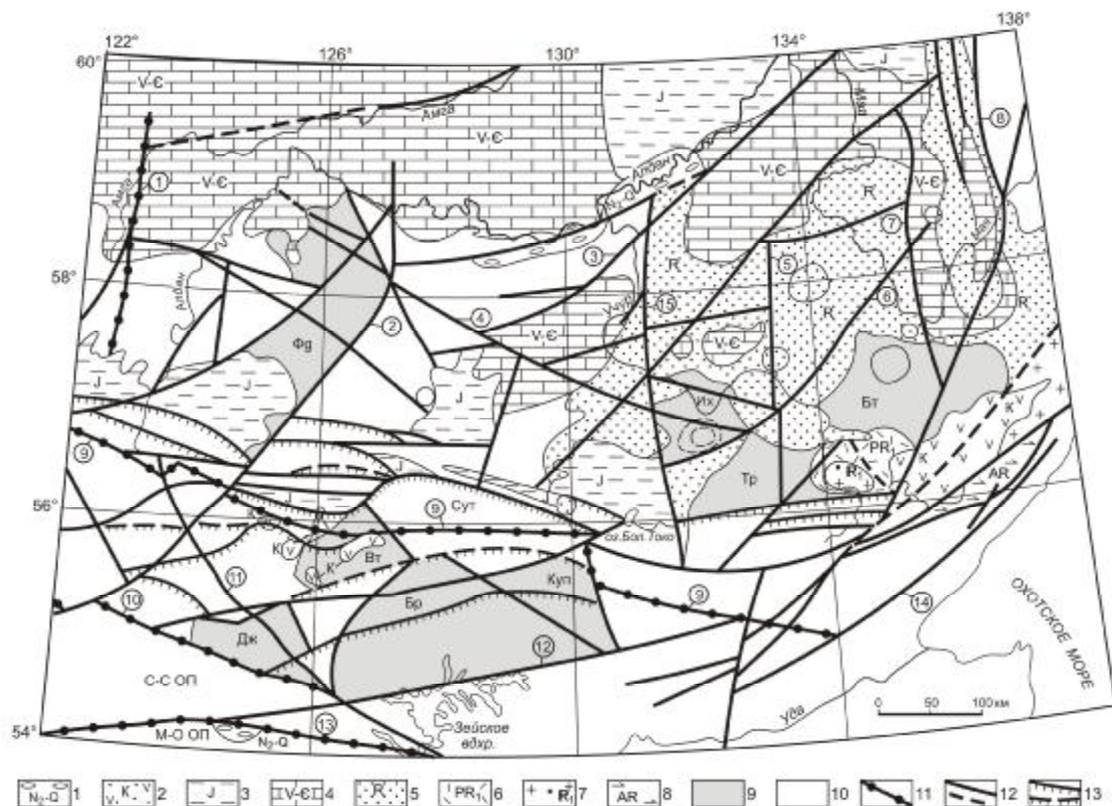


Рис.4. Структурно-тектоническая схема юго-востока Сибирской платформы, составленная по результатам дешифрирования цифровой модели, обработанной Модулем градиента рельефа.

1-неоген-четвертичные аллювиальные отложения; 2- ниже-верхнемеловые осадочно-вулканогенные образования; 3-юрские угленосные отложения; 4-венд-кембрийский плитный комплекс; 5- рифейские карбонатно-терригенные отложения чехла платформы; 6- нижнепротерозойские вулканогенные образования; 7-граниты раннепротерозойского улканского интрузивного комплекса; 8- архейские анортозиты джугджурского комплекса; 9-блоки архейского фундамента, отличающиеся от граничных с ними блоков фоном и текстурой рельефа: Фд-Федоровский, ИХ-Идюмо-Хайканский, Тр-Тырканский, Бт-Батомгский, Дж-Джелтулакский, Вт-Верхнетимптонский, Бр-Брянтинский, Куп-Купуринский; 10-остальные неидентифицированные блоки фундамента, 11-крупные глубинные разломы 1-го порядка; 12-прочие кругопадающие разломы; 13-надвиги.

Названия разломов: 1-Амгинский, 2-Тимптонский, 3-Легденский, 4-Толук-Иджекский, 5-Уянский, 6-Учуро-Майский, 7-Нельканский, 8-Бурхалинский, 9-Становой, 10-Джелтулакский, 11-Гилюйский, 12-Верхне-Зейский, 13-Северо-Тукурингский, 14-Прибрежный, 15-Идюмский.

расчлененной (светло-серым). Наиболее контрастно выглядит блок, ограниченный с запада Имангра-Томмотским, а с востока-Тимптонским северо-восточными глубинными разломами протяженностью до 300-400км и сложенный преимущественно федоровским структурно-формационным комплексом метаморфических пород.

В восточной части Алданской области от окружающих блоков серым фоном и характерным рисунком рельефа выделяется Тырканский блок, сложенный породами тырканской серии нижнего архея. Блок имеет тектонические границы со смежными

блоками, характеризуется меньшей расчлененностью и петельчатой тонкополосчатой текстурой с преимущественно северо-западным направлением полос. Полосчатый рисунок рельефа объясняется пестротой литологического состава тырканской серии, сложенной частой перемежаемостью гнейсов различного состава, мраморов и кальцифиров. Менее четко по этим признакам выделяется Идюмо-Хайканский и Батомгский блоки. Из наложенных на кристаллическое основание структур в Алданской гранит-зеленокаменной области выделяются Улканский вулканогенный прогиб, Учуро-Майская мезо-неопротерозойская впадина, Юдомо-Майский неопротерозойский авлакоген, эдиакарий-кембрийский плитный комплекс и юрские угленосные впадины. Улканский вулканогенный прогиб выделяется наименее уверенно. Платформенные образования мезо-неопротерозоя и кембрия отличаются от метаморфических толщ разной контрастностью рельефа (темносерый фон) или, в случае равенства этих показателей, его текстурой. Для пород каллимия-криогения Учуро-Майской впадины характерен петельчатый рисунок местности, обусловленный выходами слоистых терригенных толщ, а для пород эдиакария-кембрия, представленных, преимущественно, массивными доломитами и известняками - перистый. Юрские осадочные отложения, в зависимости от расчлененности развитого на них рельефа, выделяются серым или темносерым фоном. Наиболее контрастно темно-серым фоном на фоне светло-серого выделяется Токинская угленосная впадина. Фрагменты юрских отложений, залегающих на породах эдиакария-кембрия, отличается от них более темным цветом и иным характером перистого рельефа.

Становая гранит-зеленокаменная область Таксакандинским разломом также разделяется на две части: западную между Джелтулакским и Иктандинским разломом и восточную между Удским вулканогенным прогибом на востоке и Иктандинским разломом на западе. Западная часть Становой области, в виду меньшей контрастности рельефа, выделяется темно серым фоном средней интенсивности. По интенсивности серого фона и текстуре рисунка в ней уверенно выделяется несколько блоков: Верхнетимпонский, Джелтулакский и Брянтинский. Верхнетимпонский блок отличается мозаичной текстурой в связи с мелкоблоковым внутренним строением и развитием позднемезозойских вулканических полей и гранитоидов. Джелтулакский блок обладает тонкополосчатым рисунком, полосы в котором вытянуты в северо-западном направлении. Брянтинский блок, обладающий слабо контрастным рельефом, отличается от смежных блоков пятнистым рисунком и плавным понижением окраски с юга на север. В нем большую часть территории занимают мезозойские граниты тындинско-бакаранского комплекса.

К востоку от Таксакандинского разлома серым фоном и пятнистым рисунком рельефа выделяются Купуринский и Брянтинский блоки. Остальная часть территории Становой области выделяется одним блоком.

На границе Алданской гранулит-гнейсовой и Становой гранит-зеленокаменной областей отчетливо дешифрируется Пристановая складчато-надвиговая зона, представляющая собой систему надвигов и крутых субширотных разломов, прослеживающихся от западной рамки представленного рисунка до Прибрежной системы северо-восточных разломов на протяжении свыше 800км при ширине 50-100км. В раннем протерозое она контролировала шовные прогибы, выполненные

вулканогенно-осадочными отложениями, зеленокаменные пояса и зоны диафторированных пород, от которых, в результате эрозионных процессов, сохранились только отдельные фрагменты.

В юрское время эта система разломов контролировала заложение Южно-Алданского рифтогенного угленосного прогиба протяженностью свыше 700км и шириной 100-150км. В позднем мезозое, в результате горизонтальных напряжений при взаимодействии Сибирской платформы и Центрально-Азиатского тектонического пояса, в зоне Станового разлома нашла свое широкое развитие система надвигов с амплитудой горизонтального перемещения по разным оценкам от 17 до 40 и более км. Этими надвигами прогиб разделен на фрагменты, выделяемыми как отдельные впадины (Чульманская, Токинская) и так называемые «грабены», являющиеся ничем иным, как эрозионными «окнами» в аллохтонных покровах метаморфических толщ или выведенными на поверхность юрскими отложениями в ограниченных разломами тектонических клиньях. Тектонические подвижки в зоне продолжаются и в настоящее время. На это указывает интенсивное проявление в ней малоглубинных землетрясений различной интенсивности.

Надвиги дешифрируются и в Становой гранит-зеленокаменной области (рис.3.) Это подтверждается и структурными методами геофизики (сейсморазведка, МТЗ).

Остальные разломы имеют широтную, меридиональную, северо-западную и северо-восточную ориентировки. Разломы северо-восточного направления развиты, преимущественно, в восточной части исследованной территории, северо-западного - в центральной и западной, субширотного – в зоне стыка Становой и Алданской областей. Меридиональные разломы развиты, преимущественно, в Алданской гранулит-гнейсовой области.

Практически все известные крупные разломы нашли свое отражение на схеме дешифрирования, но уточняются по положению на местности. Наиболее крупные из них:(с запада на восток ): Амгинский, Становой, Гилюйский, Желтулакский, Северо-Тукурингрский, Уянский, Нельканский, Учуро-Майский, Зейский и др. Выявлены новые тектонические нарушения, не нашедшие своего отражения на изданных картах. Наиболее интересными в металлогеническом отношении являются Идюмский, Кет-Капский, Тимптонский, Имангра-Томмотский и целый ряд других. Занимающий несколько другое положение, чем Тимптонский разлом, Тимптонский надвиг четко не проявлен.

### **Заключение**

Применение преобразованных Модулем градиента и Лапласианом на поверхности Гаусса цифровых моделей рельефа дает хорошие результаты. Их интерпретация позволяет значительно более точно устанавливать размеры и взаимоотношения различных геологических объектов, а повышенная обзорность - увязывать разрозненные природные элементы в единое целое и распознавать большое количество однородных и разнородных геологических объектов. Мелкомасштабность снимков является основным фактором, определяющим генерализацию изображения, которая способствует выделению крупных геологических объектов.

Благодаря разгрузке от отвлекающих и маскирующих деталей, на преобразованных радарных снимках на первый план выступают наиболее

существенные крупные черты геологического строения региона. Вследствие суммарного влияния перечисленных особенностей повышается глубинность дешифрирования, так как наблюдаются генерализованные проекции региональных и глобальных структур.

Результаты визуального анализа преобразованных цифровых моделей местности исследованного региона показали их широкие возможности при решении задач региональной геологии.

Визуальным дешифрированием на исследованной территории выделяются крупные геоблоки земной коры: Алдано-Становой щит, Селенга-Становой и Монголо-Охотский орогенные пояса, а в их пределах - блоки более высоких порядков. Наложённые на докембрийское основание плитные комплексы, терригенные и вулканогенно-терригенные впадины и прогибы картируются как по тональности, обусловленной отличной от окружающих территории контрастностью развитого на них рельефа, так и по текстуре.

Уверенно выделяются крупные разломы и кольцевые структуры, связанные с магматическими куполами и вулкано-тектоническими депрессиями. Часто удается проследить уже известные разломы на значительно большие расстояния, чем это отображено на существующих картах.

Широкие возможности преобразованных цифровых моделей рельефа при тектоническом районировании исследуемых территорий, геологическом картировании, структурных и металлогенических исследованиях должны найти свое применение на всех этапах региональных геологических исследований.

## **Литература**

1. Гаврикова С. Н., Николаева Л. Л., Галанин А. В. и др. Ранний докембрий южной части Становой складчатой области. М.: Недра, 1991. 171с.
2. Геологическая карта Российской Федерации м-ба 1: 1 000 000. Лист О-(50), 51-Алдан. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ. 1998.
3. Геологическая карта СССР м-ба 1: 1 000 000. Лист 0-52, (53)-Томмот. Объяснительная записка. Л.: ВСЕГЕИ. 1986.
4. Государственная геологическая карта СССР м-ба 1: 1 000 000 (новая серия). Лист О-(53), 54-Охотск. Объяснительная записка. Л.:Недра. 1982.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1: 1 000 000. Лист N-51- Сковородино. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ. 2008.
6. Геологическая карта СССР м-ба 1: 1 000 000 (новая серия). Лист N-52, (53)-Зея. Объяснительная записка. Л.: Недра. 1985.
7. Геологическая карта Хабаровского края и Амурской области. М-б 1:2 500 000. Объяснительная записка. Научный редактор Л. И. Красный. Хабаровск: 1991. 49с.
8. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) Ответственные редакторы Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин. М.: Наука/Интерпериодика, 2001. 571с.

9. Ковач В. П., Котов А. Б., Сальникова Е. Б. и др. Sm-Nd изотопная систематика курумканской толщи иенгрской серии Алданского щита//Стратиграфия. Геологическая корреляция. 1996. Т. 4. №3. С.3-10.
10. Becker, J. J., D. T. Sandwell, W. H. F. Smith, J. et al. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30\_PLUS, Marine Geodesy, 32:4, 355-371, 2009.
11. Smith, W. H. F., and D. T. Sandwell, Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, Science, v. 277, p. 1957-1962, 26 Sept., 1997
12. Koenderink, J. J. 'The structure of images', Biological Cybernetics 50, 1984 pp363-370.
13. Lindeberg, T. "Discrete derivative approximations with scale-space properties: A basis for low-level feature extraction", J. of Mathematical Imaging and Vision, 3(4), pp. 349-376, 1993. (<http://www.nada.kth.se/~tony/abstracts/Lin93-JMIV.html>)
14. Lindeberg, T. "On the axiomatic foundations of linear scale-space". In J. Sporring et al., editor, Gaussian Scale-Space Theory. Kluwer, 1996.
15. Lindeberg, T. "Scale-space: A framework for handling image structures at multiple scales" In: Proc. CERN School of Computing, Egmond aan Zee, The Netherlands, 8–21 September, 1996.
16. Lindeberg, Tony "On the axiomatic foundations of linear scale-space: Combining semi-group structure with causality vs. scale invariance", Revised version published as Chapter 6 in J. Sporring, M. Nielsen, L. Florack, and P. Johansen (eds.) Gaussian Scale-Space Theory: Proc. PhD School on Scale-Space Theory, (Copenhagen, Denmark, May 1996), Kluwer Academic Publishers, 1997.
17. Lindeberg, Tony "Edge detection and ridge detection with automatic scale selection", International Journal of Computer Vision, 30, 2, pp 117-154, 1998. (<http://www.nada.kth.se/cvap/abstracts/cvap191.html>)
18. Lindeberg, Tony 'Scale-Space', In Encyclopedia of Computer Science and Engineering (Benjamin Wah, ed), John Wiley and Sons, Volume IV, pages 2495-2504, Hoboken, New Jersey, 2009.
19. Romeny, B. t. H. Front-End Vision and Multi-Scale Image Analysis, Kluwer/Springer. (2003).
20. Witkin, A. P. Scale-space filtering, In: Proc. 8th Int. Joint Conf. Art. Intell., 1983. pp 1019-1022.
21. Young, R. A., Lesperance, R. M., Meyer W. W.. (2001) 'The Gaussian Derivative model for spatial-temporal vision: I. Cortical model', Spatial Vision, Vol. 14, No. 3,4, pp. 261-319. 2001
22. Космическая фотосъемка и геологические исследования (под редакцией Г. Б. Гониной и С. И. Стрельникова) Л.: Недра, 1975. 416с.