УДК 553.3/.4:553.04:528.8(571.63)

О КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕКТОНОПАР СДВИГОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

[1,2]Шевырёв С.Л.

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, e-mail: shevyrev@mail.ru;
[2]Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Снижение интереса отечественных исследователей к технологиям дистанционного зондирования Земли как к методикам геодинамических и прогнозно-поисковых исследований, требует наращивания исследовательских усилий, направленных на их актуализацию. Одним из направлений этой деятельности может явиться применение численных геодинамических моделей для оценки материалов дистанционного зондирования Земли, включающих геофизическую съемку и результаты дешифрирования аэро- и космических снимков. Сдвиговые дислокации, часто встречающиеся на активных окраинах континентов совместно с системами разрывных нарушений второго порядка, сопровождаются региональным магматизмом и рудообразовательными процессами. Для корректного описания этих процессов, а также дальнейшего развития геодинамических моделей, кинематика зон взаимодействия субпараллельных сдвигов и формируемых ими структурных ансамблей нуждается в формализации и создании прикладных решений на основе технологий компьютерного моделирования. Динамика формирования и парагенезисы сдвиговых дислокаций горно-складчатых поясов трансформных континентальных окраин могут быть численно описаны с помощью реологических моделей, создаваемых на основе дифференциальных уравнений Стокса. Решение этих уравнений на плоскости методом конечных разностей (МКР) позволяет оценить амплитуду деформаций, а также относительное положение и асимметрию зон межсдвиговых дислокаций, сформированных при различной скорости и последовательности активизации сдвигов. Выделением зон межсдвигового растяжения и сжатия можно проводить интерпретацию геофизических аномалий и анализ систем трещин, дешифрированных на дистанционной основе. Приведены направления развития этой методики для зоны активного межплитного взаимодействия Азиатского континента и Тихоокеанской плиты, в течение истории геологического развития которой присутствовали эпизоды трансформного геодинамического режима.

Ключевые слова: численное моделирование, дистанционное зондирование Земли, тектонические парагенезисы

ON COMPUTER MODELING OF SHEAR COLLOCATIONS FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

[1,2]Shevyrev S.L.

[1]Far East Geological institute, FEB RAS, Vladivostok, e-mail: shevyrev@mail.ru;
[2]Far Eastern Federal University, FEFU, Vladivostok

Recent decrease of the domestic researchers' interest to the technologies of remote sensing of the Earth as to the approach of the search and prospecting demands efforts of their actualization. One of the possible directions could be the application of the numeric geodynamic models to the assessment of remote sensing data including geophysical surveying and results of recognition of aero- space imagery. Shear dislocations of the active continental margins that could be found together with faults of the second order are accompanied by regional magmatism and ore forming processes. Accurate description of that processes and further development of the geodynamic models need formalization of strike-slip kinematics and application of the computer technologies. Dynamics of the forming process and paragenesis of the shear deformations of the transform margins folded belts could be numerically described by the rheological models based on the Stokes equations. Solution of these equations on the plane by the Finite Difference Method (FDM) allows assessment of the deformation amplitude as well as the relative position and the asymmetry of the dislocations between shear faults. Outlining of the interfault extension and contraction could allow more comprehensive interpretation of the geophysical anomalies and analysis of the fracture assemblages, detected on the remote base. Directions of the further development of this description technique are also interpreted for the zone of active interaction between Asian continent and the Pacific plate, where transform regime was acting during the geological history.

Keywords: numeric modeling, remote sensing, tectonic collocations

Для зоны активного межплитного взаимодействия окраины Восточной Азии в литературе описаны многочисленные крупные сдвиговые структуры различной глубины заложения [1–3], представляющие собой сдвиги режима трансформной континентальной окраины, а также границы крупных блоков земной коры, террейнов и супертеррейнов. При этом детали строения синсдиговых структур и зон, а также особенности их формирования могут опускаться в масштабе рассмотрения. В пределах Сихотэ-Алинского складчатого пояса – протяженной надсубдукционной структуры обрамления Восточной Азии, рассматриваемой в пределах Приморского и Хабаровского краев, располагаются скопления рудного вещества, а также благо-

родных металлов, ассоциированные с гранитоидным магматизмом (Лермонтовское (W), Партизанское (TR, W), Тигриное (Sn, W), Многовершинное (Au-Ag), Салют (Au-Ag) и другие). Численные расчеты полей напряжений участков их локализации интрузий – источников рудного вещества могут способствовать проведению на их основе комплекса стуктурно-парагенетических признаков региональных исторических и минерагенических исследований и создание предпосылок прогноза зон коры, благоприятных для процессов рудогенеза.

Целью настоящего исследования, включающего моделирование тектонопар сдвигов, является формирование представлений об ожидаемых деформациях горных пород в межсдвиговых зонах и их морфологическом выражении на плоскости для дальнейшего использования в технологиях дистанционного зондирования Земли. Дешифрирование космических снимков горно-складчатых областей и интерпретация получаемых тектонических схем в ряде случаев требует рассмотрения кинематики зон сжатия или растяжения, ограниченных системами субпараллельных сдвигов. Численное моделирование может дать сведения о положении и направлении смещения межсдвиговой зоны при различных скоростях и амплитудах перемещения крыльев сдвигов. В то время как имеющиеся традиционные представления о тектонопарах разрывных структур позволяют рассуждать о строении межсдвиговых зон лишь качественно, численные модели предоставляют количественные сведения с возможностью имплементации результатов для конкретной геологической обстановки исследуемой территории.

Материалы и методы исследования

Анализ структурного паттерна территории, полученного при обработке дистанционного космического изображения, требует выяснения его генезиса, главных направлений трещиноватости и роли действующих сил. Для описания региональной тектоники при значительных температурах и давлении, а также длительном времени воздействия уместно говорить о реологическом процессе. В этом случае твердое вещество рассматривается как очень вязкая жидкость, текущая с низкой скоростью в течение длительного времени. В синсдвиговых зонах Сихотэ-Алиня описаны (например, [4]) флюидальные текстуры тектонической брекчии. При этом авторами [4] указывается, что проницаемость породы для рудоносных растворов присутствовала именно на этапе вязкопластического течения субстрата.

Постановка задачи моделирования производится следующим образом. Производная поля деформации *u* по времени (производная Лагранжа) является вектором скорости смещения (течения) $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ таким образом, что

$$v_i = \frac{Du_i}{Dt}. \qquad (1)$$

Тензор деформации может быть представлен в виде градиента деформации [5]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right). \qquad (2)$$

Тензор скорости деформации является производной деформации по времени:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right). \qquad (3)$$

Деформация непрерывной среды является следствием изменений баланса действующих внешних и внутренних сил. Для сопоставления этих сил и вызываемых ими деформаций используются *уравнения сохранения импульса непрерывной среды в гравитационном поле*, соответственно:

Эйлера:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = \rho\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial x_i}\right), \qquad (4)$$

Лагранжа:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = \rho \frac{Dv_i}{Dt}. \qquad (5)$$

Сохранение импульса жидкости в поле силы тяжести описывается *уравнением движения Навье – Стокса*:

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i = \rho \frac{Dv_i}{Dt}, \qquad (6)$$

где σ'_{ij} – *девиаторное* напряжение, выражающееся как

$$\sigma'_{ij} = \eta\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right), \qquad (7)$$

где η – вязкость среды.

Конечно-разностное представление уравнений импульса и неразрывности может быть сформулировано на плоскости без учета гравитационной компоненты [5, Eq. 7.18]:

$$\eta\frac{v_{x(i,j-1)}-2v_{x(i,j)}+v_{x(i,j+1)}}{\Delta x^2}+$$
$$+\eta\frac{v_{x(i-1,j)}-2v_{x(i,j)}+v_{x(i+1,j)}}{\Delta y^2}=0, \qquad (8)$$

$$\eta\frac{v_{y(i,j-1)}-2v_{y(i,j)}+v_{y(i,j+1)}}{\Delta x^2}+$$
$$+\eta\frac{v_{y(i-1,j)}-2v_{y(i,j)}+v_{y(i+1,j)}}{\Delta y^2}=0. \qquad (9)$$

Уравнения (10)–(11) используются для нахождения значений компонентов скорости вязко-пластичного течения вещества v_x и v_y методом конечных разностей (МКР) в среде научных и инженерных расчетов и программирования Mathworks Matlab (рис. 1).

Для решения этой задачи на моделируемой плоскости в программу необходимо ввести входные параметры: значения динамической вязкости и плотности вещества (например, отсюда [6, таблица B. 5]), направление, время и амплитуду перемещения по разлому. Для линии разлома на горизонтальной плоскости задаются краевые значения компонентов скорости сдвигового перемещения на крыльях.

Ортогональные компоненты перемещения рассчитываются аналитически:

$$v_x = l\cdot\cos(\alpha), \qquad (10)$$

$$v_y = l\cdot\sin(\alpha), \qquad (11)$$

где α – угол ориентации разлома на плоскости, l – амплитуда смещения по разлому.

```
% Вязкость среды
eta     =   1e+21; %Пуаз
% Число узлов модели
xnum    =   41; % по горизонтали
ynum    =   51; % по вертикали
%Решение y-уравнения Стокса
for i=1:1:ynum
  for j=1:1:xnum
    % Глобальный индекс текущего узла
    k=(j-1)*ynum+i;
    %Граничные условия
    if (i==1 || i==ynum || j==1 || j==xnum) %границы поля, vy=0
        L(k,k)=1;
        R(k,1)=0;
    elseif(j==Ayx(2) && i>=Ayx(1) && i<=Byx(1)) %по сместителю
        L(k,k)=1;
        R(k,1)=v_y;
    elseif(j==Ayx(2)+1 && i>=Ayx(1) && i<=Byx(1)) %по сместителю
        L(k,k)=1;
        R(k,1)=-v_y;
    else
%Внутренние узлы, уравнение в форме конечных разностей
 %ETA(d2vx/dx2+2vx/dy2)=ETA*((vx(i,j-1)-2vx(i,j)+vx(i,j+1))/dx^2+(vx(i-
1,j)-2vx(i,j)+vx(i+1,j))/dy^2)
L(k,k-ynum)= eta/xstp^2;  %глобальный индекс для vy(i,j-1)
L(k,k-1) = eta/ystp^2;  %глобальный индекс для vy(i-1,j)
L(k,k) = -2*eta/xstp^2-2*eta/ystp^2; %глобальный индекс для vy(i,j)
L(k,k+1) = eta/ystp^2; %глобальный индекс для vy(i+1,j)
L(k,k+ynum)= eta/xstp^2; %глобальный индекс для vy(i,j+1)
% Условия для правой части уравнения:0
R(k,1)= 0;
   end
  end
end
%Нахождение вектора решений S()
S       =   L\R;
vy   =   zeros(ynum,xnum);
% Нахождение значений в точках грида
for i=1:1:ynum
  for j=1:1:xnum
    % Глобальный индекс текущего узла
    k           = (j-1)*ynum+i;
    vy(i,j) = S(k);
  end
end
```

Рис. 1. Нахождение значений компонента скорости v_y для внутренних и граничных узлов МКР в Matlab

Результаты исследования и их обсуждение

Рассматриваемая модель представляет интерес для анализа кинематики зон, сопровождающих параллельные разломы как собственно трансформного, так и субдукционного тектонических режимов, описанных на активных континентальных окраинах. Моделирование двух параллельных равноамплитудных сдвигов, выполненное в Matlab описанным выше способом, позволяет оценить кинематику и распределение напряжений и деформаций на плоскости (рис. 2).

Анализ распределения направлений вязкопластического течения вещества позволяет установить зоны S-образных дислокаций в пространстве между сдвигами (рис. 2, в). Показано ортогональное сдвигу простирание трещин растяжения (рис. 2, е).

В своей обзорной работе [7, с. 156] авторы приводят характеристику трещиноватого паттерна левосдвиговой зоны. Для нашей модели можно предположить наличие близкой картины и в приложении к глубинному Центральному Сихотэ-Алинскому разлому – главному сдвигу в осевой части Сихотэ-Алинского складчатого сооружения. Формирование зоны противотечения внутри пространства между параллельными сдвигами приводит к формированию растяжения, сопряженного со сдвигом (транстенсии).

Анализ устойчивости модели проводится изменением исходных значений скорости (амплитуды) перемещений по левому и правому разлому. Для этого задавались значения скорости смещения 25 км и 10 км за 1 млн лет. При моделировании осевая транстенсионная зона смещается в сторону разлома с меньшей скоростью перемещения, вызывая ее асимметрию (рис. 3, а–в). В соответствии с [7], для осевой зоны сдвига характерны диагональные направления трещин сдвига и ортогональные – растяжения (рис. 3, г).

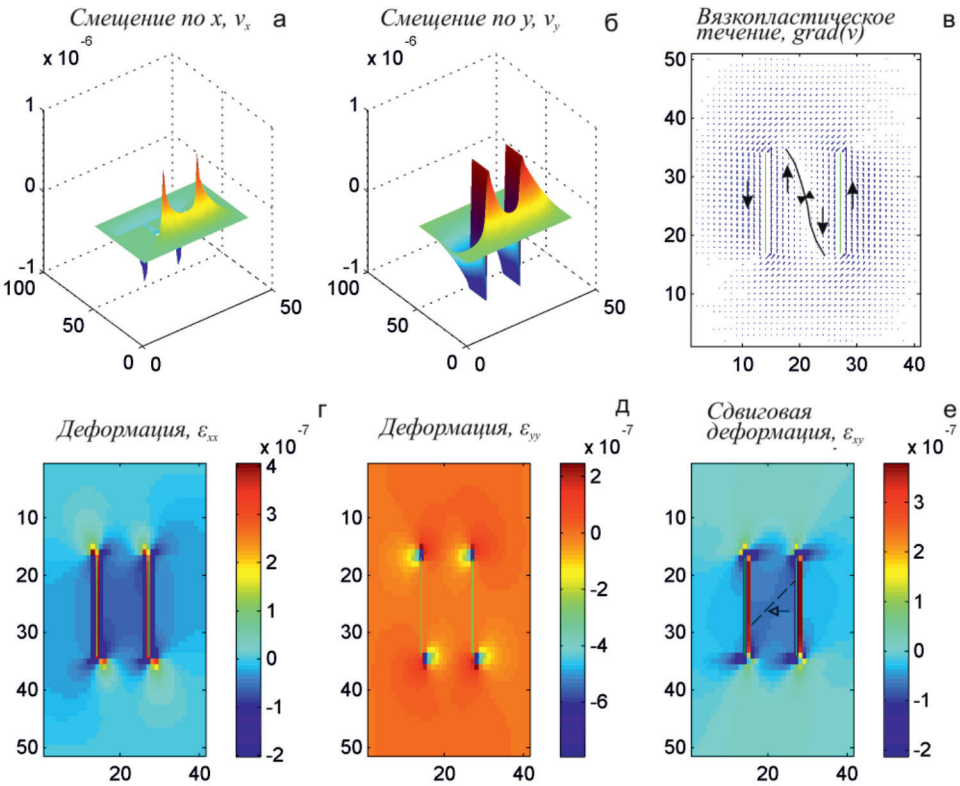

Рис. 2. Кинематика модели системы параллельных левосторонних сдвигов: а – v_x компонента; б – v_y компонента; в – градиент перемещения вещества и формирования зоны косого сдвига; г, д – ортогональные компоненты деформации ε_{xx}, ε_{yy}; е – сдвиговая компонента деформации ε_{xy} (стрелкой показано вероятное простирание трещин растяжения)

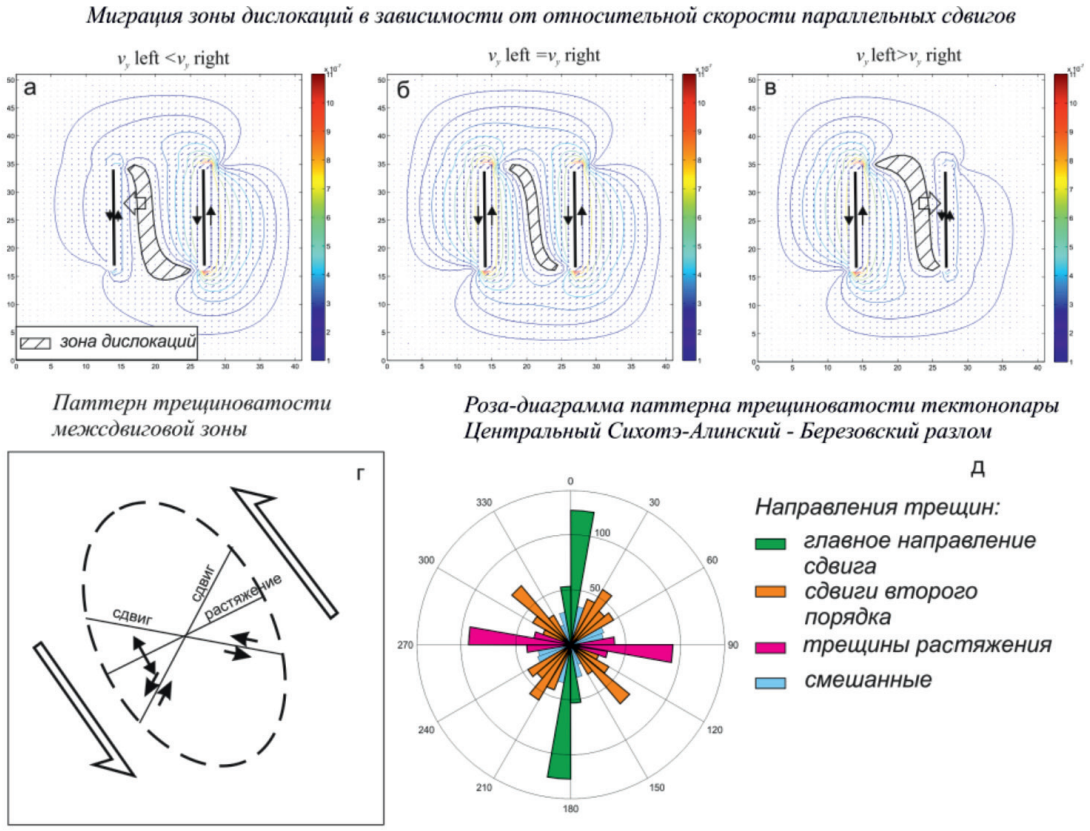

Рис. 3. Кинематика и положение межсдвиговой зоны: а–в – асимметрия транстенсионной зоны при различных соотношениях скорости смешения по разломам тектонопары; г – паттерн трещин растяжения (отрыва) и сдвига зоны растяжения; д – роза-диаграмма паттерна трещиноватости, полученная для тестовой площади

Таким образом, в межсдвиговом пространстве субпараллельных левых сдвигов формируется транстенсионная правосдвиговая зона. Правые сдвиги осложняются наличием растяжений, бассейновых структур («pull-apart») и полей трещиноватых, меланжированных и милонитизированных пород, проницаемых для магм и флюидов [7].

Свидетельством наличия режима транстенсионных правосдвиговых зон в структуре Журавлевского террейна Сихотэ-Алинского горно-складчатого пояса могут являться устойчивые в течение геологической истории характерные S-образные паттерны зон сопряжения крупных субпараллельных сдвигов, осложненные многоактным интрузивным магматизмом орогенного этапа [8]. Дешифрирование и учет линеаментов [9] на данном участке показывает характерную картину: главные направления трещиноватости осложняются структурами растяжения и сдвига второго порядка (рис. 3, д). В свою очередь, подтвержденное наличие транстенсионного правосдвигового режима на площади может явиться основанием для прогноза на ней ассоциированных месторождений: скарновых, грейзеновых, жильно-метасоматических и медно-порфировых.

Выводы

Синтез используемой численной модели и технологий обработки дистанционного изображения (включающих линеаментный анализ и построение роз-диаграмм трещиноватости) позволяет описать и интерпретировать наблюдаемую картину сложной зоны дислокаций систем параллельных разломов. Паттерны трещиноватости дистанционного изображения, дополненные данными численного геодинамического моделирования, могут рассматриваться в качестве прогнозно-поискового признака месторождений полезных ископаемых межсдвиговых зон. Компьютерное моделирование тектонопар лево- и правосторонних

сдвигов может применяться для описания и прогноза зон транстенсии и транспрессии. Площади межсдвиговой транстенсии (растяжения) исключительно перспективны для выяснения генезиса депрессий осадочных бассейнов и зон внедрения интрузивных тел.

Список литературы / References

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Т. 1, 2. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 982 с.

Geodynamics, magmatism and metalgenius of the East of Russia. T. 1, 2 / Pod red. A.I. Hanchuka. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. 982 p. (in Russian).

2. Крук Н.Н., Голозубов В.В., Киселев В.И., Крук Е.А., Руднев С.Н., Серов П.А., Касаткин С.А., Москаленко Е.Ю. Палеозойские гранитоиды южной части вознесенского террейна (южное приморье): возраст, вещественный состав, источники расплавов и обстановки формирования // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 3. С. 32–53. DOI: 10.30911/0207-4028-2018-37-3-32-53.

Kruk N.N., Kruk E.A., Rudnev S.N., Golozubov V.V., Kiselev V.I., Kasatkin S.A., Moskalenko E.Y., Serov P.A. Paleozoic Granitoids of the Southern Part of the Voznesenka Terrane (Southern Primorye): Age, Composition, Melt Sources, and Tectonic Settings // Russian Journal of Pacific Geology. 2018. T. 12. № 3. P. 190–209. DOI: 10.1134/S1819714018030041.

3. Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M., 2014. A geodynamic perspective of world-class gold deposits in East Asia. Gondwana Research 26 (2014) 816–833. DOI: 10.1016/j.gr.2014.05.007.

4. Ненахов В.М., Никитин А.В., Фелофьянов Д.С., Ненахова Е.В. Структурно-вещественные особенности рудного поля «Глухое» в контексте эволюции Журавлёвского террейна (Сихотэ-Алинь) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 67–76.

Nenachov V.M., Nikitin A.V., Felofianov D.S., Nenakhova E.V. The Structure of the Ore Field «Glukhoe» in the Context of Evolution of Zhuravlev Terrane (By Sykhote-Alin) // Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. 2018. № 1. P. 67–76 (in Russian).

5. Gerya Taras. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling. Cambridge University Press, 2010. 292 p.

6. Turcotte D.L., Schubert G. Geodynamics. Cambridge University Press. Third edition, 2014. 657 p.

7. Einstein H.H., Dershowitz W.S. Tensile and shear fracturing in predominantly compressive stress fields – a review. Engineering Geology. 1990. Vol. 29. Issue 2. P. 149–172.

8. Sakhno V.G., Kovalenko S.V., Alenicheva A.A. 2011. Monzonitoid magmatism of the copper-porphyritic Lazurnoe deposit (South Primorye): U-Pb and K-Ar geochronology and peculiarities of the ore-bearing magma genesis by the data of isotopic-geochemical studies. Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 438. Issue 1. P. 569–577. DOI: 10.1134/S1028334X11050072.

9. Шевырёв С.Л. Программа LEFA: Автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. 2018. № 10. С. 138–143.

Shevyrev S.L. LEFA Software: an Automatized Structural Analysis of Remote Sensing Imagery in Matlab Environment // Advances in current natural sciences. 2018. № 10. P. 138–143 (in Russian).