

Современные движения и деформации в районе Кандалакшского залива по данным ГНСС мониторинга

Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Розенберг Н.К.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, guseva@ifz.ru, ik@ifz.ru, annmok@ifz.ru, rosenna@ifz.ru

Аннотация. Данная работа посвящена определению современных движений и внутриплитных деформаций зоны Кандалакшского грабена и прилегающих территорий Балтийского щита по данным спутниковых измерений, а также сопоставление распределений скоростей современного деформационного поля с потоком сейсмической энергии для этого района. В основу работы легли данные четырех циклов измерений, полученных на геодинамическом полигоне, заложенном в 2015 г. на побережье Кандалакшского залива для изучения локальных движений в зоне активного грабена.

Скорость горизонтальных смещений составила 22.3 мм/год. Обнаружена область опускания со скоростью до 6 мм/год для пункта NILM на фоне общего поднятия со скоростью до 2 мм/год. Анализ планового деформирования территории показывает, что аномальное проявление деформационного поля, выявленное в западной части Кандалакшского залива, приурочено к протяженной узкой зоне сжатия, простирающейся с юга на север Балтийского щита. Наибольшая интенсивность сейсмических проявлений характерна для его северной части. Область распределения сейсмического потока с максимальными значениями P_E до 10^{10} Дж/год на единицу площади образует дугу от Ботнического залива через Кандалакшский залив и далее по Кольскому полуострову. Для западного побережья Кандалакшского залива свойственна повышенная сейсмичность. Протяженная зона сейсмической активности отмечает переход от поднятия к проседанию, захватывает территории с аномальными проявлениями деформационного поля, а так же маркирует переход от деформаций сжатия к растяжению. Аномальные значения деформаций, совпадающие с повышенными значениями выделившегося потока сейсмической энергии, подтверждают наличие активных современных процессов в зоне Кандалакшского грабена.

Ключевые слова: Балтийский щит, ГНСС, деформационное поле, сейсмический поток, спутниковые измерения, сейсмичность.

Modern movements and deformations in the Kandalaksha Bay area according to GNSS monitoring data

Guseva T.V., Krupennikova I.S., Mokrova A.N., Rozenberg N.K.

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, guseva@ifz.ru, ik@ifz.ru, annmok@ifz.ru, rosenna@ifz.ru

Abstract. This work is devoted to determining current movements and intraplate deformations of the Kandalaksha graben zone and adjacent territories of the Baltic Shield according to satellite measurements, as well as comparing velocities of the modern deformation field with the seismic energy flow for this area. The work is based on data of four measurement cycles at the geodynamic polygon established in 2015 on the coast of the Kandalaksha Bay to study local movements in the active graben zone. The rate of horizontal displacement was 22.3 mm/year. An area of lowering with the rate of up to 6 mm/year was detected for the NILM point on the background of the general rise with the rate of up to 2 mm/year. The analysis of the horizontal deformation of the territory shows that the anomalous pattern of the deformation field detected in the western part of the Kandalaksha Bay is confined to an extended narrow compression zone stretching from the south to the north of the Baltic Shield. The greatest intensity of seismic events is specific to its northern part. The seismic flow distribution area with maximum PE up to 10^{10} J/year per unit area forms an arc from the Gulf of Bothnia through the Kandalaksha Bay and further along the Kola Peninsula. The western coast of the Kandalaksha Bay is characterized by an increased seismicity. The extended zone of seismic activity marks the transition from uplift to subsidence, engaging territories with abnormal manifestations of the deformation field, and also marks the transition from compression deformations to stretching. Abnormal deformations coinciding with increased values of the released seismic energy flow confirm the presence of active modern processes in the Kandalaksha graben zone.

Keywords: Baltic Shield, GNSS, deformation field, seismic flow, satellite measurements, seismicity.

Введение

Балтийский (Фенноскандинавский) щит, являющийся выступом докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы, многие годы привлекает внимание исследователей. С одной стороны изучения требуют современные вертикальные движения, отражающие сводовое поднятие, которые зафиксированы здесь различными методами. С другой стороны — изучение и анализ современных движений, деформаций и сейсмичности в исследуемом регионе необходимы для повышения безопасности строительства и эксплуатации ответственных инженерных объектов.

Кандалакшский грабен является одной из активных структур восточной части Фенноскандии. Этот район отличается от прилегающих территорий более высоким уровнем сейсмической активности (Николаева, 2019). Сильнейшее историческое землетрясение 1627 г. имело интенсивность (I_0) = VIII баллов и магнитуду $M = 6.5$ (Ассиновская, Никонов, 2004). Слабые сейсмические события с $M = 2-4$ фиксируются и в настоящее время, подтверждая продолжающуюся тектоническую активность структур.

Сотрудники лаборатории спутниковых методов изучения геофизических процессов ИФЗ РАН начали проводить комплексные деформационные исследования в данном регионе с применением технологий ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем) с конца прошлого века (Прилепин и др., 2002) и продолжают наблюдения по настоящее время (Гусева и др., 2020). В 2015 году был заложен новый геодинимический полигон на побережье Кандалакшского залива для изучения локальных движений в зоне активного грабена. На данный момент времени проведено 4 цикла спутниковых наблюдений. В представленной работе помимо результатов наблюдений на побережье Кандалакшского залива 2015–2021 гг. использованы данные повторных измерений ГНСС, выполненных сотрудниками ИФЗ РАН в Карелии (2006–2021 гг.) и Ленинградской области (2007–2021 гг.). В обработку также включены измерения на 20 постоянно действующих станциях спутниковых наблюдений международной службы ГНСС (IGS) в России, Финляндии, Швеции и Норвегии.

Методика измерений и обработки данных

Координатные измерения ГНСС на закрепленных пунктах геодинимических полигонов исследуемого региона выполняются способом дифференциального позиционирования в статическом режиме при одновременной регистрации сигналов спутников ГНСС (GPS и ГЛОНАСС) с помощью двухчастотных двухсистемных спутниковых геодезических приемников Javad Maxo с интервалом регистрации 30 с. Повторные синхронные измерения ГНСС на пунктах региональных геодинимических сетей проводятся в летние месяцы, сериями по 3–20 суток при одновременном использовании 6–8 комплектов аппаратуры.

Данные, полученные с геодезических приемников, обрабатываются в программном комплексе Bernese. В результате определяются среднесуточные и средние на эпоху измерений геоцентрические и геодезические координаты пунктов в международной наземной координатной системе ITRF14.

Полученные в результате расчета изменения во времени плановых координат относительно начальной эпохи измерений описываются линейной функцией с уровнем согласия близким к единице. Дисперсия полученных значений для плановых координат в среднем составляет 0.6 мм, для высотных — не превышает 2.4 мм.

Геодинимическая активность Кандалакшского залива и прилежащих территорий

Результаты обработки данных ГНСС измерений позволяют определить скорости движений приповерхностных слоев земной коры в международной наземной системе координат ITRF. Вертикальные движения отражают процесс сводового поднятия территории Балтийского щита со скоростью до 9.5 мм/год, которое на российской территории составляет не более 5 мм/год (рис. 1 а). Горизонтальные смещения происходят в северо-восточном направлении со средней скоростью от 21 мм/год на севере региона до 25 мм/год на юге исследуемой территории. Для территории Кандалакшского залива скорость горизонтальных смещений составила 22.3 мм/год. Для пунктов PKND и NILM получены скорости 25.7 и 25.2 мм/год, что превышает ожидаемые значения. Отметим наличие об-

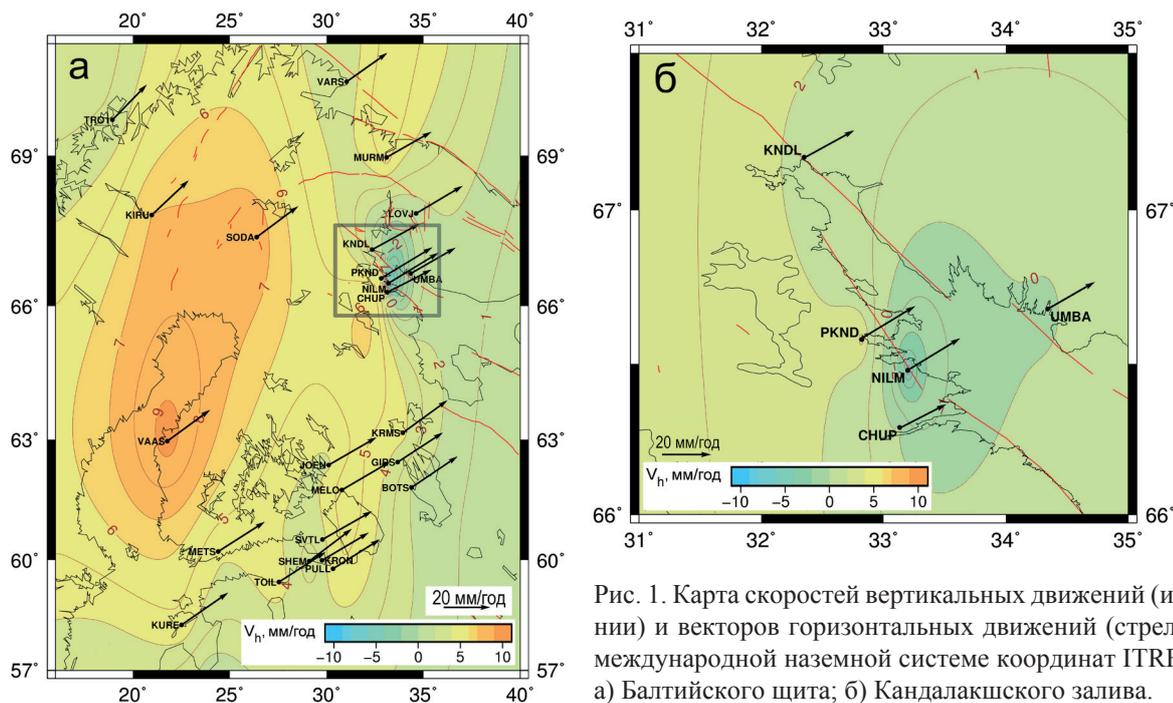


Рис. 1. Карта скоростей вертикальных движений (изолинии) и векторов горизонтальных движений (стрелки) в международной наземной системе координат ITRF для: а) Балтийского щита; б) Кандалакшского залива.

Fig. 1. Map of vertical motion velocities (isolines) and horizontal motion vectors (arrows) in the international terrestrial coordinate system ITRF for: a) the Baltic Shield; b) the Kandalaksha Bay.

ласти опускания со скоростью до 6 мм/год для пункта NILM на фоне общего поднятия со скоростью до 2 мм/год (рис. 1 б).

Для оценки значений горизонтальных движений в пределах исследуемого региона рассчитывались смещения относительно пункта KIRU, находящегося на северо-западе территории (рис. 2). Внутрорегиональные горизонтальные смещения имеют преимущественно юго-восточное направление со значениями скоростей от 1.1 мм/год на северо-западе до 7.6 мм/год на юго-востоке.

По значениям плановых координат пунктов и скоростям их изменения рассчитан первый инвариант тензора деформаций для определения площадных деформаций сжатия и растяжения. Анализ планового деформирования территории показывает, что большая часть территории развивается в условиях слабого растяжения до $(1-2) \times 10^{-8}$ в год. На общем спокойном деформационном фоне выделяется протяженная узкая зона сжатия, простирающаяся с юга на север (рис. 2 а). К ней приу-

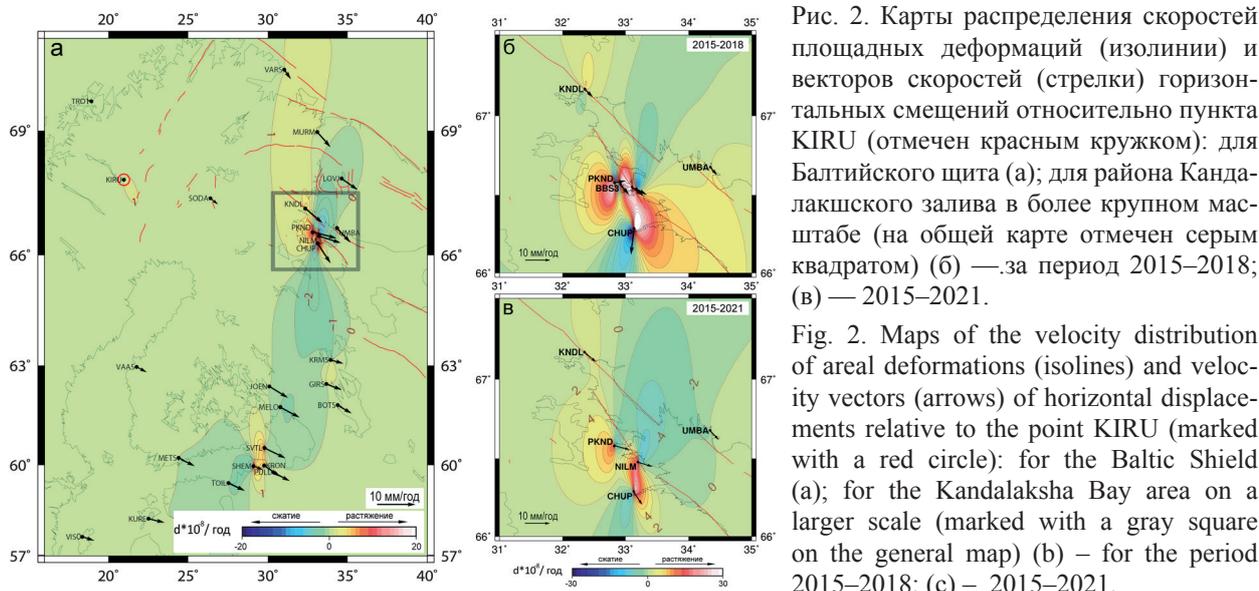


Рис. 2. Карты распределения скоростей площадных деформаций (изолинии) и векторов скоростей (стрелки) горизонтальных смещений относительно пункта KIRU (отмечен красным кружком): для Балтийского щита (а); для района Кандалакшского залива в более крупном масштабе (на общей карте отмечен серым квадратом) (б) — за период 2015–2018; (в) — 2015–2021.

Fig. 2. Maps of the velocity distribution of areal deformations (isolines) and velocity vectors (arrows) of horizontal displacements relative to the point KIRU (marked with a red circle): for the Baltic Shield (a); for the Kandalaksha Bay area on a larger scale (marked with a gray square on the general map) (b) – for the period 2015–2018; (c) – 2015–2021.

рочено аномальное проявление деформационного поля, выявленное в западной части Кандалакшского залива.

На рис. 2(б, в) представлены карты скоростей площадных деформаций района Кандалакшского залива за разные временные интервалы. Поскольку в 2021 году отсутствуют измерения с некоторых пунктов, которые были задействованы в предыдущие циклы измерений, распределение деформационного поля сильно сглажено по сравнению с результатами, полученными ранее. Тем не менее, зона аномального растяжения до 20×10^{-8} в год, приуроченная к западному борту Кандалакшского грабена, прослеживается на обеих картах.

Сейсмичность

Для оценки сейсмической активности региона использовались данные каталога землетрясений, предоставленного Кольским филиалом Единой геофизической службы РАН (2000–2018 гг.) как основного, а в качестве дополнительных – USGS (United States Geological Survey) (2000–2018 гг.), ISC (International Seismological Centre) (2019–2021 гг.).

В пределах рассматриваемой части Фенноскандии зафиксировано 195 сейсмических событий с магнитудами $0.7 \leq M_s \leq 4.1$. В основном это слабые землетрясения с магнитудами до 3.3, только девять с $M_s > 3.5$. На район Кандалакшского залива приходится 36 сейсмических событий со средней $M_s = 1.5$. Наиболее сильное инструментально зафиксированное землетрясение, с $M_s = 3.5$, произошло в 2001 г, в районе оз. Нигозеро, расположенного в 5 км от п. Пояконда, где впоследствии был заложен один из опорных пунктов геодинамического полигона.

Для расчета потока сейсмической энергии P_E (Дж/год) на единицу площади (Гусева и др., 2020), территория была разбита на ячейки, для каждой из которых проведено суммирование сейсмической энергии всех землетрясений за выбранный временной интервал. Площадь ячеек составила 10000 км² для всей территории и 500 км² для Кандалакшского залива. Полученные суммарные значения присвоены центру каждой ячейки.

Наибольшая интенсивность сейсмических проявлений характерна для северной части исследуемой территории. Выделяется вытянутая сейсмоактивная зона диагональной направленности с юго-запада на северо-восток в районе Финского залива (рис. 3 а). Область распределения сейсмического потока с максимальными значениями P_E до 10^{10} Дж/год на единицу площади образует дугу от

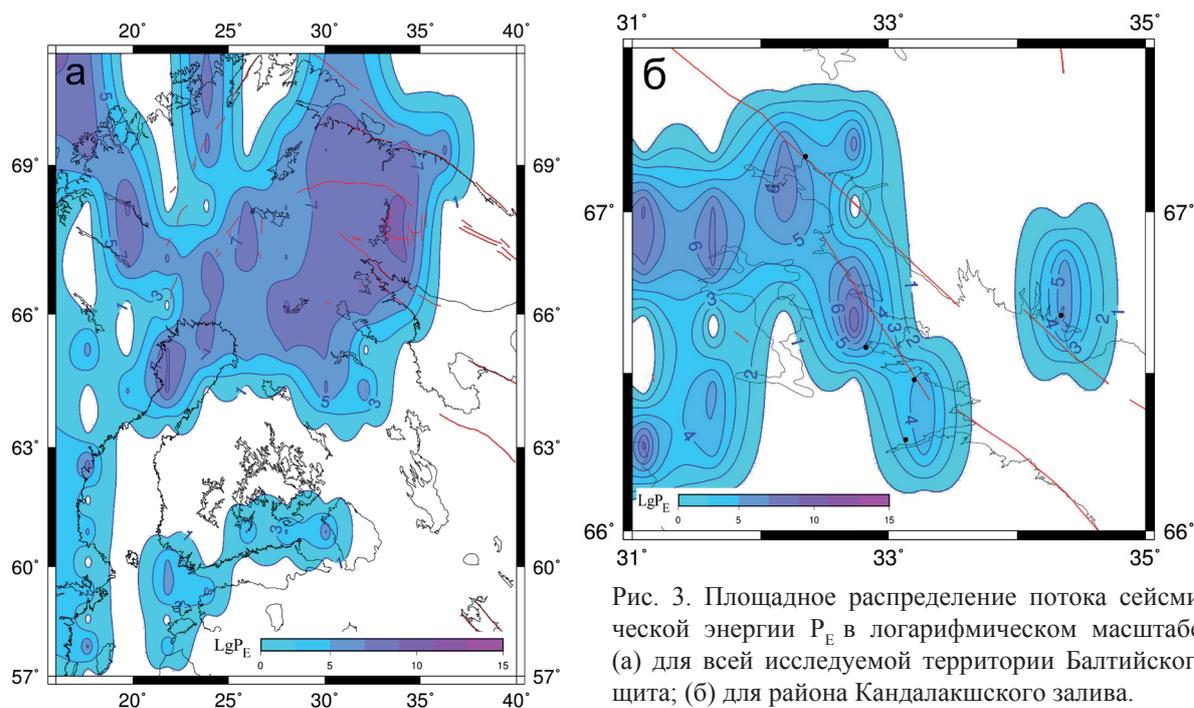


Рис. 3. Площадное распределение потока сейсмической энергии P_E в логарифмическом масштабе: (а) для всей исследуемой территории Балтийского щита; (б) для района Кандалакшского залива.

Fig. 3. Areal distribution of the seismic energy flow P_E in logarithmic scale: (a) for the entire area of the Baltic Shield under study; (b) for the Kandalaksha Bay area.

Ботнического залива через Кандалакшский залив и далее по Кольскому полуострову. Аналогичный расчет для Кандалакшского залива выявил сейсмоактивную зону со значениями P_E до 10^9 Дж/год на единицу площади по западному борту Кандалакшского грабена (рис. 3 б).

Проведено сопоставление вертикальных скоростей и площадного распределения скоростей деформации земной коры с сейсмическим потоком P_E (Дж/год) на единицу площади для анализа геодинамической активности региона (рис. 4 а, б).

Для западного побережья Кандалакшского залива свойственна повышенная сейсмичность. Протяженная зона сейсмической активности отмечает переход от поднятия к проседанию (рис. 4 а), захватывает территории с аномальными проявлениями деформационного поля, а так же маркирует переход от деформаций сжатия к растяжению (рис. 4 б).

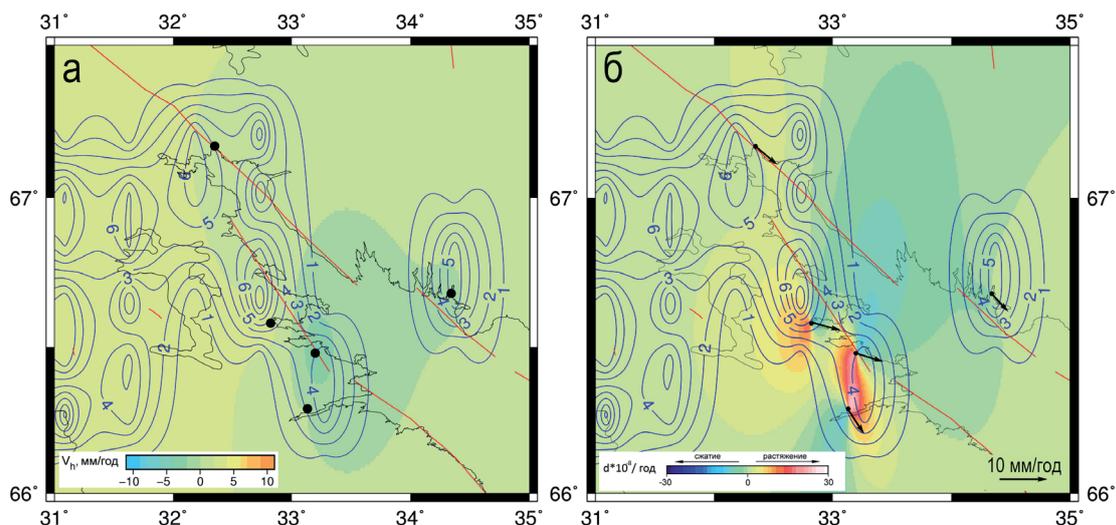


Рис. 4. Сопоставление потока сейсмической энергии (изолинии построены в логарифмическом масштабе) с вертикальными движениями (а), и площадным распределением скоростей горизонтальных деформаций сжатия-растяжения (б) (показаны цветом) для Кандалакшского залива.

Fig. 4. Comparison of the seismic energy flow (isolines in a logarithmic scale) with the vertical movements (a) and the areal distribution of the velocities of horizontal compression-stretching deformations (b) (in color) for the Kandalaksha Bay.

Заключение

В результате проведенных исследований современных движений и деформаций земной коры с применением спутниковых технологий и сопоставлении их с местной сейсмичностью, можно сделать первые выводы об активности геодинамических процессов в количественном выражении, происходящих в районе Кандалакшского грабена. На фоне общего поднятия зафиксирована область опускания со скоростью до 6 мм/год, возможно отражающая специфику геолого-тектонического развития отдельных более малых структурных элементов грабена. Аномальные значения деформаций, совпадающие с повышенными значениями выделившегося потока сейсмической энергии, подтверждают наличие активных современных процессов в зоне Кандалакшского грабена и свидетельствуют о необходимости продолжать деформационные наблюдения с использованием спутниковых технологий.

Литература

1. Ассиновская Б.А., Никонов А.А. Сводный каталог землетрясений Карельского региона за 1542–2003 гг. // Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления (ред. Шаров Н.В.). Карельский научный центр РАН. Петрозаводск. 2004. С. 218–222.

2. Гусева Т.В., Крупенникова И.С., Мокрова А.Н., Передерин В.П., Розенберг Н.К. Спутниковый мониторинг и сейсмическая активность северо-запада России // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 1. С. 24–32. <https://doi.org/10.21455/gr2020.1-2>.
3. Николаева С.Б. Последниковая тектоника и палеосейсмодислокации в районе участка Ковды (Кандалакшский залив Белого моря) // Вестник Санкт-Петербургского университета Науки о Земле. 2019. Т. 64. № 3. С. 434–453. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.304>.
4. Прилепин М.Т., Мишин А.В., Кабан М.К., Баранова С.М. GPS изучение геодинамики Балтийского щита // Физика Земли. 2002. № 9. С. 49–58.