

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. И. Трегуб, С. В. Бондаренко

МЕТОДЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Учебное пособие

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	5
1. 1. Надглобальные геодинамические системы.....	5
1. 2. Глобальные геодинамические системы.....	9
1. 3. Региональные и локальные геодинамические системы.....	22
2. МЕТОДЫ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	25
2. 1. Структурные методы в геодинамическом анализе	25
2. 1. 1. Картирование полей тектонических деформаций.....	25
2. 1. 2. Картирование полей тектонических напряжений	35
2. 2. Анализ вертикальных и латеральных рядов геодинамических обстановок.....	40
2. 2. 1. Формации – индикаторы геодинамических обстановок.....	41
2. 2. 2. Геохимические индикаторы геодинамических обстановок	44
3. ГЕОДИНАМИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ	48
3. 1. Принципы составления геодинамической карты	48
3. 2. Содержание и оформление геодинамической карты	50
Библиографический список.....	52

что порождает радиальное растяжение планеты в плоскости экватора, которое таким образом сочетается с ее полярным сжатием, величина которого составляет около 22 км. На промежуточных территориях суммарный вектор по величине и направлению определяется по известному правилу параллелограмма. Поскольку R уменьшается с глубиной, с глубиной понижается и центробежная сила, достигая нулевого значения на оси вращения.

На величину центробежной силы оказывает влияние масса элементарного объема (m), которую можно охарактеризовать плотностью вещества ($m=\rho$). На наиболее отчетливо выраженных границах геосфер плотность резко изменяется. Наиболее существенные скачки плотности происходят на границе нижней мантии и ядра (от 5.68 г/см³ до 9.89 г/см³), а также между внешним и внутренним ядрами (от 9.89 г/см³ до 12.26 г/см³). Таким образом, на фоне в целом плавного уменьшения величины центробежной силы вследствие уменьшения радиуса вглубь планеты происходят ее скачкообразные изменения на границах геосфер. Это явление может способствовать своеобразному расслоению планеты и формированию ослабленных зон на границах геосфер.

Центробежная сила изменяется при изменении угловой скорости осевого вращения планеты (ω). Такие изменения обусловлены различными факторами, имеют периодический характер и происходят на фоне общего замедления осевого вращения. Инструментальными наблюдениями установлена периодичность изменения скорости вращения трех порядков: суточная, сезонная, декадная. С помощью спутниковой локации установлено, что с этой периодичностью согласуется периодичность изменения фигуры Земли.

Общее уменьшение скорости осевого вращения обусловлено, прежде всего, тормозящим влиянием приливов. При оценках приливных сил необходимо учитывать влияние не только Луны (невозмущенная составляющая), но и Солнца (возмущенная составляющая). Масса Луны составляет 1/81 долю от массы Земли. Луна вместе с Землей образуют единую планетную систему (двойную планету), центр (*барицентр*) которой расположен на расстоянии 0,8 земного радиуса. Эклиптика Земли – это плоскость орбиты барицентра. Система Земля–Луна, вращаясь вокруг барицентра, сообщает Земле приливную силу как со стороны Луны 0,000056 см/с², так и со стороны Солнца – 0,00002 см/с². Величина этой силы определяется взаимным расположением Солнца, Луны и Земли и выражается закономерным чередованием сигизийных и квадратурных приливов.

Угловая скорость осевого вращения Земли существенно больше угловой скорости ее вращения вокруг барицентра. По этой причине, как отмечает академик Ю. Н. Авсюк, между линией, соединяющей центры Луны и Земли, и линией, соединяющей вершину приливного «горба» и центр Земли, образуется определенный угол. При положительном значении этого уг-

ла гравитационное взаимодействие ускоряет орбитальное движение Луны и замедляет вращение Земли. Если угол отрицательный, то замедляется орбитальное движение Луны и ускоряется вращение Земли. Замедление и ускорение орбитальной скорости Луны приводят, соответственно, к приближению и удалению ее от барицентра. Этот процесс проявляется в периодическом увеличении и ослаблении гравитационной связи в системе Луна–Земля. Диапазон «ухода-прихода» зависит от кинетической энергии вращения планеты, и поэтому он ограничен величиной 8 радиусов Земли (50960 км). Современное расстояние Земля–Луна равно 60 радиусам – 380 000 км. Исходя из этих данных, можно оценить изменение периода вращения Земли, продолжительность сидерического месяца. Флуктуация энергии в цикле достигает нескольких процентов от кинетической энергии вращения Земли. При ее изменении на 1% и постоянном значении момента инерции период вращения планеты вокруг оси увеличивается или уменьшается в диапазоне 10 минут, что влечет за собой изменения центробежного ускорения в пределах $0,02 \text{ см/с}^2$. Это значительно превышает вариации приливной силы (современный модуль – $0,0002 \text{ см/с}^2$) и может сказаться на динамическом сжатии Земли и отношении экваториальной и полярной осей в диапазоне порядка сотен метров.

Продолжительность сидерического месяца для крайних орбитальных положений Луны составляет (в сутках): для 350350 км – 24; для 382200 км (современное) – 27, для 414050 км – 30. В зависимости от этого изменения наклона экватора к эклиптике находятся в пределах 10° .

Согласно схеме эволюции системы Земля–Луна ось вращения изменяет свое положение, изменяется и модуль скорости вращения. При медленных перемещениях оси и малых приращениях скорости время изменения напряженного состояния больше времени упруго-вязкой релаксации напряжений в породах, и ослабление напряжений реализуется механизмами пластической деформации. При быстром изменении режима вращения Земли (прохождение Луной среднего положения), характерное время меньше времени упруго-вязкой релаксации – происходит разрушение пород. Рассматриваемая схема предусматривает цикличность, когда периоды относительно плавного развития сменяются периодами активизации. Существует принципиальная возможность объяснить инверсии магнитного поля. За время цикла оболочки находятся то в режиме ускорения, то в режиме торможения, а значит, течение в жидком ядре будет менять свой знак.

Приливные силы приводят к вынужденному перемещению внутреннего ядра Земли, в результате чего смещается центр тяжести планеты. Перемещение центра тяжести приводит к смещению полюсов и деформациям поверхности со скоростью до 2 см/год. Приливные силы и скачки скорости вращения служат триггерами разрядки напряжений, влияя на суточную и более крупную периодичность тектонической активности. Изменение сжа-

тия Земли при изменении скорости вращения порождает дополнительные напряжения. Крайне слабые, но постоянно действующие приливы в режиме сжатия-растяжения раскачивают блоки коры, увеличивая проницаемость зон разломов для флюидов, водорода, гелия. Энергия приливов составляет примерно 10^{30} эргов, что в 10 тысяч раз меньше энергии ротационных сил. Приливы действуют как своеобразная вибрация. Лунные приливы вызывают напряжения в *тонкой приповерхностной оболочке Земли* и при этом амплитуда вариаций максимальна на экваторе и минимальна на полюсах.

Увеличение скорости осевого вращения планеты происходит за счет векового гравитационного сжатия. По астрономическим и геофизическим данным скорость этого сжатия в среднем за столетие составляет 2,6 см, а в современную эпоху по расчетам А. Т. Асланяна – до 6,4 см за 100 лет. Тем не менее, скорость вращения уменьшается, поскольку приливное вековое замедление в три раза больше векового ускорения, обусловленного гравитационным сжатием. Устанавливаемое по астрономическим данным увеличение длины суток за 100 000 лет (+2 с) – результат сложения приливо обусловленного роста суток (+3 с) и уменьшения периода осевого вращения за счет векового сжатия (–1 с). Кроме того, на изменение скорости осевого вращения Земли оказывают влияние особенности ее движения по орбите вокруг Солнца и перемещения вместе с Солнечной системой вокруг ядра Галактики. Это влияние заключается в релятивистском изменении массы планеты и, как следствие, увеличении или уменьшении скорости осевого вращения.

Кроме центробежной силы и силы тяжести, в систему входит сила Кориолиса. Она проявляется в наблюдаемом отклонении пути тела, перемещающегося во вращающейся системе координат. Таким образом, Кориолисово смещение – это результат движения элементарного объема с изменением его широтного положения и вращения Земли вокруг своей оси. Вектор силы Кориолиса определяется из соотношения:

$$F_k^- = 2m [\Omega^- \cdot V^-],$$

где m – масса элементарного объема, Ω^- – вектор частоты вращения Земли (направленный на Полярную звезду), V^- – вектор скорости движения элементарного объема.

Влияние силы Кориолиса может выражаться в особенностях движения конвективных потоков или перемещения литосферных плит.

М. В. Стовас (1962), а затем и Г. Н. Каттерфельд (2000) показали, что при полярном сжатии планеты, которое сопряжено с растяжением в экваториальной плоскости, с учетом трехосности геоида, выделяются экстремальные и критические круги. Экстремальные круги – параллели 0° , 62° , 90° ; меридиан $105-75^\circ$. Здесь наиболее велики нормальные радиальные напря-

жения. Критические круги – это зоны параллели 35° и меридианов $60-120^\circ$ и $150-30^\circ$, где максимального значения достигают касательные напряжения. При этом в процессе общего замедления скорости вращения и, связанного с ним векового уменьшения полярного сжатия Земли Северное полушарие опережает Южное и возникает полярная асимметрия фигуры Земли. На севере параллель 62° ограничивает Северный Ледовитый океан, а на юге – Антарктиду. При вращательном движении происходит вековое относительное отставание северных зон и опережение южных, нарастающее от экватора и полюсов к параллелям 62° , чем объясняется относительный сдвиг обоих полушарий по указанным параллелям и S – образное искривление меридиональных осей Америки, Австралии и преобладание на большей части литосферы разломов северо-западного простирания.

При взаимодействии центробежной силы, направленной перпендикулярно к оси вращения, силы тяжести, ориентированной к центру планеты, силы Кориолиса, вызывающей отклонение пути, возникает сложная структура поля напряжений.

1.2. Глобальные геодинамические системы

Глобальные геодинамические системы возникают как следствие процессов, возникающих при взаимодействии геосфер. Геосферы делятся на внешние и внутренние (геосферы твердой Земли). Они отличаются друг от друга по вещественному составу, агрегатному состоянию и реологическим свойствам. Внешние геосферы (атмосфера и гидросфера) – это воздушная (газовая) и водная (жидкая) оболочки. Основными химическими элементами, составляющими атмосферу, являются азот и кислород, а гидросферу – водород и кислород. Гидросфера и атмосфера вместе образуют *географическую оболочку*.

Атмосфера прослеживается до высот в несколько тысяч километров, но основные атмосферные процессы протекают на высотах 20–40 км. У земной поверхности, без учета водяного пара, воздух состоит (в процентах по объему) из: азота – 78,08 %; кислорода – 20,95 %; аргона 0,93 %, углекислого газа 0,03 %. На все остальное приходится не более 0,01 %. Вся атмосфера планеты весит 5 000 000 млрд т. Водяной пар составляет от 0,2 до 2,5 % от общей массы воздуха во влажных тропиках. Если воздух сжать до плотности стали, то получился бы слой толщиной 12,5 м. Атмосфера подразделяется на ряд концентрических сфер.

Тропосфера – самый нижний слой, в котором температура понижается с увеличением высоты. Мощность тропосферы на экваторе до 17 км, в средних широтах – 10–12 км, около полюсов – 8–9 км. Эти различия обусловлены действием ротационной системы сил. У экватора температура в подошве тропосферы $+25^\circ\text{C}$, а у ее верхней границы -80°C . Верхние

1–2 км тропосферы называются тропопаузой. В ее пределах температура остается постоянной. Тропосфера содержит 4/5 массы атмосферы и характеризуется значительной изменчивостью температуры и давления, быстрыми перемещениями воздушных масс по вертикали и латерали. Здесь содержится почти весь водяной пар и формируется подавляющая часть облаков.

Стратосфера начинается выше тропопаузы, где температура вначале медленно повышается до высоты 25 км, а затем быстро растет до температуры поверхности Земли (на высоте 50 км) и остается постоянной до высоты примерно 80 км (стратопауза). В стратосфере почти нет водяного пара, но при этом на высотах 25–30 км отмечаются перламутровые облака, состоящие из переохлажденных капель воды. В стратосфере расположен озоновый слой – зона максимального содержания озона – трехатомного кислорода. Следы озона фиксируются в диапазоне высот от 15 до 70 км. Максимальная его концентрация наблюдается на высотах 18–20 км. Озоновый слой поглощает ультрафиолетовую часть спектра солнечной радиации (диапазон 0.15–0.29 нм), повышает температуру в верхней части атмосферы, делает возможным существование жизни на планете.

Мезосфера расположена выше стратопаузы. Она характеризуется понижением температуры до $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, наличием сильной турбулентности, появлением серебристых облаков, состоящих из кристалликов льда. Давление в ней, в тысячу раз меньше, чем у поверхности Земли. Верхняя граница мезосферы называется мезопаузой. Ниже этой границы сосредоточено 99,5 % массы всей атмосферы. Остальные составляющие разреза атмосферы (термосфера, экзосфера) характеризуется очень разреженным воздухом и по существу представляют околоземное космическое пространство.

Особое положение занимает *ионосфера*. Она начинается с высот 60–80 км и прослеживается на расстоянии, измеряемом несколькими земными радиусами. Ионосфера характеризуется высокой плотностью ионов и резко увеличенной электрической проводимостью. Это плазменная оболочка Земли. В ней выделяются слои снизу вверх, начиная с высоты 100 км: D, E, F₁, F₂. Последние два находятся на высотах 300–350 и 400 км и обладают максимальной концентрацией ионов. Именно эти слои обеспечивают загоризонтное распространение сигналов коротковолновых радиостанций. На высотах около 130 км температура в ионосфере достигает $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ионосфера откликается на подготовку землетрясений в основном слое E (100–130 км) и в слое F₁ (200–350 км). Причина такого отклика, возможно, связана с внутренними атмосферными гравитационными волнами, которые вызывают образование плазменных пузырей (объемов с пониженной плотностью в ионосфере).

Приземная атмосфера мощностью 1,5 км называется *планетарным пограничным слоем*. Она подвержена влиянию трения о земную поверхность. Именно в этом слое происходит обмен теплом и водяным паром с земной поверхностью и с поверхностью океана, возникает облачность, а скрытая