Ðîäèîíîâ Â.Í.

Î×ÅÐÊ ÃÅÎ ÌÅÕÀÍÈÊÈ

(íàòóðôèëîñîôèÿ)

Ìîñêâà
Íàó÷íûé Ìèð
1996

"...Îí ðóêîâîäñòâîâàëñÿ áîëüøå ÷àñòüþ çäðàâûì ñìûñëîì,
ïóòåâîäèòåëåì ðåäêî âåðíûì è
ïî÷òè âñåãäà íåîñòîðîæíûì..."

À.Ñ. Ïóøêèí

Âñòóïëåíèå

Ãëóáîêîå ðàçäåëåíèå òðóäà íà ïðîèçâîäñòâå è â íàóêå, îáèëèå ïðîôåññèîíàëüíûõ ÿçûêîâ îãðàíè÷èëè îáùåíèå òåõíè÷åñêèõ ëè÷íîñòåé, ñóçèëè êðóã èõ èíòåðåñîâ; â óñëîâèÿõ æåñòêîé ðåãëàìåíòàöèè æèçíè ëþäåé è ñíèæåíèÿ êóëüòóðíûõ çàïðîñîâ ñòàëà ïðîÿâëÿòüñÿ ñâîéñòâåííàÿ ïîòðåáèòåëüñêàÿ ïñèõîëîãèÿ â îòíîøåíèè ïðèðîäû.

Îãðîìíûå äîñòèæåíèÿ â îòäåëüíûõ îáëàñòÿõ òåõíè÷åñêîãî òâîð÷åñòâà ñïîñîáñòâîâàëè ïðåóâåëè÷åíèþ ðîëè ñïåöèàëüíûõ çíàíèé, êðèòåðèåì öåííîñòè êîòîðûõ áûëà ïîëåçíîñòü èõ â ïðèîáðåòåíèè ÷åëîâåêîì âñå íîâûõ è íîâûõ ìàòåðèàëüíûõ áëàã. Â îáùåñòâå îñëàáåâàë èíòåðåñ ê öåëîñòíîìó âîñïðèÿòèþ ìèðà. Òåîðåòè÷åñêèå îáîáùåíèÿ îñòàâàëèñü äîñòîÿíèåì ñïåöèàëèñòîâ. Óêðåïëÿëèñü ïîçèöèè ïðèìèòèâíîãî ïðàãìàòèçìà, ñ îäíîé ñòîðîíû, è ìèñòèöèçìà, ñ äðóãîé.

Ïðèçíàêè äóõîâíîãî îáíèùàíèÿ ñ ðàñöâåòîì ïðîìûøëåííîé öèâèëèçàöèè îòìå÷àëèñü äàâíî, íî â ÕÕ âåêå ÷åëîâå÷åñòâî îùóòèëî óãðîçó ãëîáàëüíîãî ýêîëîãè÷åñêîãî êðèçèñà, îïàñíîñòü êîòîðîãî äî ñèõ ïîð â ïîëíîé ìåðå íå îñîçíàåòñÿ. Îòâåòñòâåííîñòü çà ñëîæèâøååñÿ ïîëîæåíèå â îáèòàåìîì ìèðå äîëæíû ðàçäåëèòü è ñîöèàëüíûå îðãàíû, âåäàþùèå ïðîñâåùåíèåì.

Ââåäåíèå

1. Ñðåäà îáèòàíèÿ ÷åëîâåêà.

×åëîâåê âûäåëÿåò èç ïðèðîäíîé ñðåäû ðàçóì, êîòîðûé ïîçâîëÿåò ëþäÿì èñïîëüçîâàòü îïûò, íàêîïëåííûé ïðåäøåñòâóþùèìè ïîêîëåíèÿìè, äëÿ ïðîãíîçèðîâàíèÿ îòäàëåííûõ ïîñëåäñòâèé ñâîåé äåÿòåëüíîñòè, îáåñïå÷èâàÿ âîñïðîèçâîäñòâî ñðåäû îáèòàíèÿ äëÿ áóäóùèõ ïîêîëåíèé è ïðîäîëæåíèÿ ðîäà ëþäñêîãî.

Â îáùåíèè ëþäåé îäíîãî ïîêîëåíèÿ, â îñíîâå îïûòà ñâîåãî è ïðîøåäøèõ ïîêîëåíèé, â ðàçðàáîòêå ìåòîäîâ îáîáùåíèÿ îïûòà è ñðåäñòâ õðàíåíèÿ íåîáõîäèìîãî äëÿ æèçíè ëþäåé Çíàíèÿ âîçíèêëî íå÷òî íåìàòåðèàëüíîå, êîòîðîå ìîæíî îáîçíà÷èòü êàê äóõîâíóþ ñôåðó ñðåäû îáèòàíèÿ ÷åëîâåêà. Â íàñòîÿùåå âðåìÿ îíà âìåùàåò ðåëèãèè, âñå èñêóññòâà è íàóêó. Äóõîâíàÿ ñôåðà èìååò ìíîæåñòâî èçìåðåíèé è íåïðåðûâíî ïðèîáðåòàåò íîâûå, ðîæäàåìûå ÷åëîâå÷åñêèì Ãåíèåì.

Ïðåäîñòàâëÿÿ ÷åëîâåêó áåñïðåäåëüíûå âîçìîæíîñòè äëÿ òâîð÷åñòâà, äóõîâíàÿ ñôåðà îäíîâðåìåííî âûðàáàòûâàåò ñâîè âíóòðåííèå çàêîíû ãàðìîíèè, ïðåïÿòñòâóþùèå åå ðàñïàäó è äåãðàäàöèè. Öåëîñòíîñòü äóõîâíîé ñôåðû îñîçíàåòñÿ ÷åëîâåêîì êàê âûñøèé Ðàçóì, ñëóæåíèå êîòîðîìó è ÿâëÿåòñÿ ñìûñëîì åãî æèçíè.

Ïåðâîíà÷àëüíî äóõîâíàÿ ñôåðà òÿãîòåëà ê òåì èñòî÷íèêàì ýìïèðè÷åñêîãî çíàíèÿ, êîòîðûìè íàäåëèëà ÷åëîâåêà Ïðèðîäà. Â íàñòîÿùåå âðåìÿ åñòåñòâîçíàíèå, íåñìîòðÿ íà ñâîå áûñòðîå ðàçâèòèå, çàíèìàåò â äóõîâíîé ñôåðå ñêðîìíîå ìåñòî è íå îêàçûâàåò äîëæíîãî âëèÿíèÿ íà ãîñïîäñòâóþùåå â îáùåñòâå ìèðîâîççðåíèå.

2. Åñòåñòâîçíàíèå.

Äóõîâíàÿ ñôåðà îáèòàíèÿ ÷åëîâåêà ñâèäåòåëüñòâóåò î ìíîãîïëàíîâîì âîñïðèÿòèè ìèðà: èñêóññòâî è ðåëèãèÿ äàþò âîçìîæíîñòü îùóòèòü ñâîå åäèíåíèå ñ ïðèðîäîé è âñåì ÷åëîâå÷åñêèì ðîäîì, åñòåñòâîçíàíèå âîîðóæàåò ÷åëîâåêà îáîáùåííûì îïûòîì îáùåíèÿ ñ âåùåñòâåííûì ìèðîì. Ìåòîäîëîãèÿ ïðåîáðàçîâàíèÿ ýìïèðè÷åñêèõ äàííûõ â íàó÷íîå çíàíèå çàêëþ÷àåòñÿ â ïîñòðîåíèè ìîäåëåé ôèçè÷åñêèõ òåë, ÿâëåíèé è ïðîöåññîâ èõ âçàèìîäåéñòâèÿ. Ìîäåëè íå ÿâëÿþòñÿ êîïèÿìè ïðèðîäíûõ îáúåêòîâ, à âûðàæàþò ëèøü ãëàâíûå õàðàêòåðíûå ñâîéñòâà èõ, îòâëåêàÿñü îò ìíîæåñòâà äåòàëåé. Íà ìîäåëÿõ èññëåäóþòñÿ âîçìîæíûå ïðîÿâëåíèÿ ýòèõ ñâîéñòâ â ðàçíûõ óñëîâèÿõ ïîä âîçäåéñòâèåì ðàçëè÷íûõ àãåíòîâ. Ýòà ìåòîäîëîãèÿ îêàçàëàñü äîâîëüíî ïëîäîòâîðíîé, îáåñïå÷èâàÿ äîñòîâåðíîå çíàíèå çà ïðåäåëàìè îáëàñòè íåïîñðåäñòâåííîãî îïûòà.

Ñîâðåìåííûå ìîäåëè ÷àñòî âîïëîùàþò èäåè è îáðàçû, ñëîæèâøèåñÿ â äðåâíåì ìèðå, ÷òî ñâèäåòåëüñòâóåò î ñòðåìëåíèè ê öåëîñòíîñòè äóõîâíîé ñôåðû, ê ñîõðàíåíèþ åå ñòðóêòóðû.

Â ìåõàíèêå, êîòîðàÿ èçó÷àåò ïðîñòåéøèå ôîðìû äâèæåíèÿ, ïîñòîÿííî îáðàùàþòñÿ ê èäåÿì äèñêðåòíîñòè è íåïðåðûâíîñòè, ëåòó÷åñòè, òåêó÷åñòè è твердости, тяжести и невесомости, которые приобретают свое конкретное содержание и меру применительно к различного рода телам и явлениям.

Так, например, идея атомов, неделимых частиц, из которых построены материальные тела, имеют сегодня весьма различное толкование, являясь носителями отличительных свойств: нуклоны определяют свойства атомов, атомы - химических элементов, молекулы - химических соединений, клетки - живых организмов.

Свойства материальных тел зависят не только от атомов, имея в виду все виды их, но и от из взаимного расположения и характера их движения.

В механике нашли широкое применение модели идеального газа, жидкости и твердого тела.

Рассмотрим подробнее эти модели и таким образом подготовимся к обсуждению моделирования объектов геомеханики и проблемы воспроизводства среды обитания человека.

Идеальный газ.

В модели одноатомного идеального газа частицы обмениваются кинетической энергией только в результате столкновений друг с другом. Если частицы находятся в замкнутом теплоизолированном объеме, то средние по времени скорости движения всех частиц одинаковы и постоянны.

Сталкиваясь со стенками, ограничивающими объем, частицы передают им импульс, что воспринимается как давление газа (p).

Для характеристики энергии хаотического движения атомов в единице объема используют температуру (T), величина которой пропорциональна квадрату средней скорости атомов. Обмен энергией газа с неподвижными стенками происходит до тех пор, пока их температуры различаются: энергия передается от тела с высокой температурой к телу холодному. Этот опытный закон используется в различных приборах, измеряющих температуру газа, а, следовательно, и энергию движения атомов в газе.

Кроме давления и температуры для характеристики свойств газа используют плотность (ρ): суммарную массу частиц, находящихся в единице объема. Число частиц в единице объема газа при фиксированных давлении и температуре одинаково для всех газов, так что плотность газа пропорциональна массе отдельного атома. Хотя расстояние между атомами в газе при атмосферном давлении примерно в 10 раз больше, чем в твердом теле, эти расстояния настолько малы, что в обыденной жизни человека газ воспринимается как сплошная упругая материя, свободно заполняющая все свободное пространство,- некое подобие эфира, образа, рожденного воображением еще в древности.

В газе все его свойства могут быть выражены через параметры движения атомов, которые обладают кинетической энергией и количеством движения (импульсом). Работа, совершаемая над газом или самим газом, (сжатие его или расширение), приводит к изменению не только плотности, но и давления и температуры. Взаимосвязь этих параметров газа называют его уравнением состояния:

$$P/\rho = nkT$$

Çäåñü n - ÷èñëî ÷àñòèö â åäèíèöå îáúåìà, P - äàâëåíèå íà åäèíèöó ïëîùàäè, T - òåìïåðàòóðà è k - ïîñòîÿííàÿ Áîëüöìàíà.

Ìàêðîñêîïè÷åñêîå äâèæåíèå ñæèìàåìîãî ãàçà ìîæåò ðàññìàòðèâàòüñÿ êàê ìåõàíè÷åñêîå òå÷åíèå ñïëîøíîé ñðåäû, åñëè çàäàíà ñâÿçü $p = p(\rho)$, ò.å. èçâåñòåí ìåõàíèçì îáìåíà ýíåðãèåé ìåæäó "ãàçîâûìè" ÷àñòèöàìè. Îäíîçíà÷íàÿ ñâÿçü $p = p(\rho)$ ïðè ìàêðîñêîïè÷åñêîì äâèæåíèè ðåàëüíîãî ãàçà ìîæåò íàðóøàòüñÿ ïî ìíîãèì ïðè÷èíàì.

Â ìíîãîàòîìíûõ ìîëåêóëàõ ÷èñëî ñòåïåíåé ñâîáîäû çàìåòíî âîçðàñòàåò: ê òðåì ïîñòóïàòåëüíûì (êàê ó àòîìà) äîáàâëÿþòñÿ òðè âðàùàòåëüíûõ ñòåïåíè ñâîáîäû, à òàêæå êîëåáàòåëüíûå. Ïðè âîçáóæäåíèè êîëåáàíèé ìîëåêóëà ìîæåò ðàçâàëèòüñÿ íà ÷àñòè, è òîãäà îáðàçóþòñÿ íîâûå ÷àñòèöû. Ñ äðóãîé ñòîðîíû, ïðè íèçêèõ òåìïåðàòóðàõ ÷àñòü êîëåáàòåëüíûõ ñòåïåíåé ñâîáîäû îêàçûâàþòñÿ "çàìîðîæåííûìè" è íå ó÷àñòâóþò â ýíåðãîîáìåíå. Ñòîëêíîâåíèå áûñòðûõ àòîìîâ ìîæåò ïðèâîäèòü ê îòðûâó ýëåêòðîíîâ è îáðàçîâàíèþ ýëåêòðè÷åñêè çàðÿæåííûõ ÷àñòèö. Íàêîíåö, òåïëîâîå èçëó÷åíèå íàãðåòîãî ãàçà óíîñèò ÷àñòü ýíåðãèè çà ïðåäåëû ãàçà. Êàçàëîñü áû, îòìå÷åííûå "íåñîâåðøåíñòâà" ðåàëüíûõ ãàçîâ ñèëüíî ñóæàþò îáëàñòü ïðèìåíåíèÿ ìîäåëè èäåàëüíîãî ãàçà. Îäíàêî ýòî íå òàê. Óñïåøíîå ïðèìåíåíèå ìîäåëè èäåàëüíîãî ãàçà â åå ïðîñòîòå: âñå ñâîéñòâà ãàçà è åãî ïîâåäåíèå îïðåäåëÿþòñÿ ÷åðåç êèíåòè÷åñêóþ ýíåðãèþ, êîòîðàÿ ðàñïðåäåëåíà ïîðîâíó ìåæäó ñòåïåíÿìè ñâîáîäû àòîìîâ è ñàìî ìàêðîñêîïè÷åñêîå äâèæåíèå íå èçìåíÿåò ïðîöåññà ìåæàòîìíîãî îáìåíà ýíåðãèåé. Êàíîíèçèðîâàâ ñâîéñòâà èäåàëüíîãî ãàçà è èññëåäîâàâ íà ìîäåëè òèïîâûå ïðîöåññû, óäàëîñü èçó÷èòü è ïîíÿòü ìíîãèå "íåñîâåðøåíñòâà" ðåàëüíûõ ãàçîâ ïóòåì ñîïîñòàâëåíèÿ èõ ñ èäåàëüíûì ãàçîì. Â ýòîì, ìîæåò áûòü, è ñîñòîèò ãëàâíîå äîñòîèíñòâî èçáðàííîãî íàóêîé ïóòè ïîçíàíèÿ îêðóæàþùåãî íàñ ìàòåðèàëüíîãî ìèðà - ÷åðåç ïîñòðîåíèå è èññëåäîâàíèå ìîäåëåé.

Èäåàëüíàÿ æèäêîñòü.

Ìîäåëü èäåàëüíîé æèäêîñòè âîïëîùàåò èäåþ òåêó÷åñòè. Íåèçìåííàÿ ïëîòíîñòü, îòñóòñòâèå âÿçêîñòè, ðàñòåêàíèå íà ãîðèçîíòàëüíîé ïëîñêîñòè ïîä äåéñòâèåì ñîáñòâåííîãî âåñà, ïðî÷íàÿ ñâÿçü æèäêèõ ÷àñòèö, îáåñïå÷èâàþùàÿ ñïëîøíîñòü òåêóùåé æèäêîñòè, - ýòè ñâîéñòâà èäåàëüíîé æèäêîñòè ðåàëèçóþòñÿ â øèðîêîì êëàññå ìàêðîñêîïè÷åñêèõ äâèæåíèé, â äàííîì ñëó÷àå, òå÷åíèé. Æèäêèå ÷àñòèöû îáëàäàþò òîëüêî êèíåòè÷åñêîé è ïîòåíöèàëüíîé ýíåðãèåé, òàê ÷òî ñîõðàíåíèå ýíåðãèè ìåõàíè÷åñêîãî äâèæåíèÿ òåì ñàìûì ïðåäîïðåäåëåíî.

Â òåõ ñëó÷àÿõ, êîãäà ïåðåìåùåíèå ÷àñòèö æèäêîñòè ñâèäåòåëüñòâóåò îá îòñóòñòâèè âèõðåé, à òå÷åíèå çàäàíî ôîðìîé ñîñóäà èëè êàíàëà, ïàðàìåòðû òå÷åíèÿ ïðåäñêàçóåìû.

Èäåàëüíàÿ æèäêîñòü ïîçâîëèëà èññëåäîâàòü ìíîæåñòâî ñëîæíûõ ãèäðîäèíàìè÷åñêèõ çàäà÷, èìåþùèõ âàæíîå çíà÷åíèå äëÿ ïðàêòèêè. Âìåñòå ñ òåì èäåàëüíàÿ æèäêîñòü äîïóñêàåò ñóùåñòâîâàíèå âèõðåâûõ ñòðóêòóð, êîòîðûå ïðîëèâàþò ñâåò íà èíòåãðàëüíûå ìåõàíè÷åñêèå ñâîéñòâà ñïëîøíûõ ñðåä â ïðèðîäíûõ óñëîâèÿõ. Â èäåàëüíîé æèäêîñòè äâèæåíèå õîðîøî îáòåêàåìîãî òåëà ïðè íåáîëüøèõ ñêîðîñòÿõ íå èñïûòûâàåò íèêàêîãî ñîïðîòèâëåíèÿ: òðàåêòîðèÿ äâèæåíèÿ æèäêèõ ÷àñòèö, îãèáàþùèõ ñôåðè÷åñêîå òåëî, ñîâåðøåííî

ñèììåòðè÷íà, à çíà÷èò äàâëåíèÿ íà ôðîíòàëüíîé è òûëüíîé ïîâåðõíîñòè îäè-
íàêîâû. Îòñóòñòâèå âÿçêîñòè èñêëþ÷àåò è òðåíèå æèäêèõ ÷àñòèö î áîêîâûå
ïîâåðõíîñòè.

Ïðè áîëüøèõ ñêîðîñòÿõ çà äâèæóùèìñÿ òåëîì âîçíèêàåò êàâèòàöèîííàÿ
ïîëîñòü â æèäêîñòè, ãäå äàâëåíèå ðàâíî íóëþ, òàê ÷òî ñîïðîòèâëåíèå äâèæå-
íèþ òåëà îïðåäåëÿåòñÿ äàâëåíèåì íà ôðîíòàëüíîé ïîâåðõíîñòè. Òðàåêòîðèè
äâèæåíèÿ æèäêèõ ÷àñòèö, êîòîðûå îêàçàëèñü íà ãðàíèöå êàâèòàöèîííîé ïîëîñ-
òè, ñõîäÿòñÿ íà íåêîòîðîì óäàëåíèè îò òåëà è âûáðàñûâàþòñÿ â âèäå ñòðóè
âñëåä òåëó.

Åñëè â êàêîé-òî ìîìåíò óáðàòü îáòåêàåìîå òåëî, òî âîçíèêøàÿ ñòðóêòóðà
òå÷åíèÿ ïðîäîëæèò ñâîå ñóùåñòâîâàíèå. Ïðè ýòîì âíóòðåííèå ñëîè (ïðèëåãà-
þùèå ê ïîëîñòè) îáðàçóþò çàìêíóòîå ñàìî íà ñåáÿ òå÷åíèå: âîçíèêàþùàÿ ïðè
ñõîæäåíèè òðàåêòîðèé äâèæóùèõñÿ ÷àñòèö ñòðóÿ, âíåäðÿÿñü â ïîêîÿùóþñÿ
æèäêîñòü, áóäåò èñïîëíÿòü ðîëü îáòåêàåìîãî òåëà. Äàëåå æèäêèå ÷àñòèöû
ñòðóè ðàñòåêàþòñÿ ïî ïîâåðõíîñòè ïîëîñòè è ñíîâà ñõîäÿòñÿ â òûëüíîé ÷àñòè
äâèæóùåéñÿ ïîëîñòè, â êîòîðîé, íàïîìíèì, äàâëåíèÿ íåò.

Íà âíåøíåé ãðàíèöå çàìêíóòîãî âèõðåâîãî òå÷åíèÿ ñêîðîñòè ðàâíû ñêîðîñ-
òè äâèæåíèÿ îáòåêàþùåé ýòîò âèõðü æèäêîñòè. Â ðåçóëüòàòå îáðàçîâàíèÿ êà-
âèòàöèîííîãî âèõðÿ âîçíèêàåò ñòðóêòóðà, ðàçäåëÿþùàÿ æèäêèå ÷àñòèöû êèíå-
ìàòè÷åñêè: ñîñóùåñòâóþò äâà ðàçíîðîäíûõ òå÷åíèÿ, ÷àñòèöû êîòîðûõ íå ñìå-
øèâàþòñÿ è íå îáìåíèâàþòñÿ ýíåðãèåé.

Åñëè áû ýòà ïàðàäîêñàëüíàÿ ñèòóàöèÿ íå èìåëà áû øàíñîâ âîçíèêíóòü â
ðåàëüíîé íåèäåàëüíîé æèäêîñòè, òî îíà íå ïðåäñòàâëÿëà áû, ïîæàëóé, äàæå
òåîðåòè÷åñêîãî èíòåðåñà. Îäíàêî, îïèñàííàÿ âûøå êèíåìàòèêà äâèæåíèÿ êà-
âèòàöèîííîãî âèõðÿ ïðàêòè÷åñêè íå íóæäàåòñÿ íè â îäíîì èç ôóíäàìåíòàëü-
íûõ ñâîéñòâ èäåàëüíîé æèäêîñòè, êðîìå íåñæèìàåìîñòè. Çíà÷èò, òàêèå ñòðóê-
òóðû âîçìîæíû, è ýòî áûëî íåäàâíî äîêàçàíî îïûòàìè.

Ðàçìåðû êàâèòàöèîííîãî âèõðÿ ìåíÿþòñÿ ñ äàâëåíèåì â îáòåêàþùåé åãî
æèäêîñòè: îáúåì óìåíüøàåòñÿ ñ ðîñòîì äàâëåíèÿ è óâåëè÷èâàåòñÿ ñ ïàäåíè-
åì. Ïðèñóòñòâèå òàêèõ âèõðåâûõ ñòðóêòóð â èäåàëüíîé æèäêîñòè ïðèäàåò åé
ñâîéñòâà ñæèìàåìîé óïðóãîé ñðåäû.

Íà ñâîáîäíîé ïîâåðõíîñòè èäåàëüíîé æèäêîñòè â ïîëå ñèëû òÿæåñòè çà
ëþáûì ïëûâóùèì òåëîì âîçíèêàþò ãðàâèòàöèîííûå âîëíû. Àìïëèòóäà êîëå-
áàíèÿ æèäêèõ ÷àñòèö â ýòèõ âîëíàõ óáûâàåò ñ óäàëåíèåì îò ïîâåðõíîñòè òåì
áûñòðåå, ÷åì êîðî÷å äëèíà âîëíû. Ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ ïîâåðõíîñòíûõ
âîëí ïðîïîðöèîíàëüíà êîðíþ êâàäðàòíîìó èç äëèíû âîëíû, ïîìíîæåííîé íà
óñêîðåíèå ñèëû òÿæåñòè.

Íà îáðàçîâàíèå ýòèõ âîëí ðàñõîäóåòñÿ ýíåðãèÿ ïëûâóùåãî òåëà, à ñëåäî-
âàòåëüíî, îíî èñïûòûâàåò ñîïðîòèâëåíèå ïîñòóïàòåëüíîìó äâèæåíèþ. Óñïî-
êîåíèå âîçìóùåííîé ïîâåðõíîñòè èäåàëüíîé æèäêîñòè ìîæåò äîñòèãàòüñÿ ðàñ-
ñåèâàíèåì ãðàâèòàöèîííûõ âîëí ïî áåçãðàíè÷íîé ïîâåðõíîñòè. Äðóãîãî ìåõà-
íèçìà ãàøåíèÿ êîëåáàíèé â èäåàëüíîé æèäêîñòè íåò.

Ïåðåìåùåíèå ëþáîãî æåñòêîãî òåëà âíóòðè ñîñóäà, ïîëíîñòüþ çàïîëíåí-
íîãî æèäêîñòüþ, âûíóæäàåò ïåðåìåùàòüñÿ êàæäóþ æèäêóþ ÷àñòèöó â îáúåìå
ñîñóäà - ñëåäñòâèå íåñæèìàåìîñòè æèäêîñòè. Åñëè ýòî òåëî äâèæåòñÿ ïî çàìê-
íóòîé òðàåêòîðèè, òî æèäêèå ÷àñòèöû, ãäå áû îíè íå íàõîäèëèñü, ïîñëå êàæäî-
ãî öèêëà áóäóò ïåðåìåùàòüñÿ â íîâîå ïîëîæåíèå, ïåðåìåøèâàÿ æèäêîñòü âî

âñåì îáúåìå ñîñóäà. Ìàêðîñêîïè÷åñêîå äâèæåíèå îòäåëüíûõ îáúåìîâ íåñæè-ìàåìîé æèäêîñòè æåñòêî ñâÿçàíî ñ äâèæåíèåì âñåõ ÷àñòèö â çàìêíóòîì îáúåìå.

Â ñæèìàåìîé æèäêîñòè ëþáîå èçìåíåíèå ìåõàíè÷åñêîãî äâèæåíèÿ â íåêî-òîðîé òî÷êå ïðîñòðàíñòâà ðîæäàåò âîëíó âîçìóùåíèÿ, ôðîíò êîòîðîé ðàñïðîñ-òðàíÿåòñÿ ñî ñêîðîñòüþ çâóêà. Çà ïðåäåëàìè ýòîé âîçìóùåííîé îáëàñòè æèä-êèå ÷àñòèöû î ñâåðøèâøåìñÿ ñîáûòèè íè÷åãî íå çíàþò. Òàêèì îáðàçîì â ñæè-ìàåìîé æèäêîñòè îñóùåñòâëÿåòñÿ â íåêîòîðîì ñìûñëå ïðîñòðàíñòâåííîå ñòðóêòóðèðîâàíèå æèäêîãî òåëà. Íàèáîëåå ÷åòêî ýòî ïðîÿâëÿåòñÿ â ñâåðõçâó-êîâûõ òå÷åíèÿõ, ãäå îáëàñòè ðàçãðàíè÷åíû íåïðîíèöàåìûìè äëÿ âîçìóùåíèé óäàðíûìè âîëíàìè.

Íàïîìèíàíèå îá îñîáåííîñòÿõ ñâåðõçâóêîâûõ òå÷åíèé è âîçìóùåíèÿõ, êî-òîðûå âñåãäà ïðèñóòñòâóþò â äâèæóùåéñÿ ñæèìàåìîé æèäêîñòè, ïîëåçíî äëÿ îïðåäåëåíèÿ îáëàñòè ïðèìåíèìîñòè ìîäåëè èäåàëüíîé æèäêîñòè, êîòîðóþ èíîãäà ìîæíî ðàññìàòðèâàòü êàê ïðåäåëüíûé ïåðåõîä ðåàëüíîé ñæèìàåìîé æèäêîñòè ïðè ñòðåìëåíèè â íåé ñêîðîñòè çâóêà ê áåñêîíå÷íîñòè.

Ñòðóêòóðèðîâàíèå èäåàëüíîé æèäêîñòè äàæå ïðè ñîõðàíåíèè òàêèõ ñâîéñòâ êàê íåñæèìàåìîñòü è îòñóòñòâèå âÿçêîñòè ïðèâîäèò ê íåñîõðàíåíèþ ìåõàíè-÷åñêîé ýíåðãèè â ïîòîêå æèäêîñòè.

Îòñóòñòâèå ìîëåêóëÿðíîé âÿçêîñòè ïðåäîïðåäåëÿåò ïîñòîÿííîå è ïîñòî-ÿííîå âîçíèêíîâåíèå âèõðåâîãî äâèæåíèÿ â ïîòîêå æèäêîñòè. Åñòåñòâåííî ïî-ëàãàòü, ÷òî ðàçâèòèå âèõðåâîé ñòðóêòóðû ïðîèñõîäèò, íà÷èíàÿ ñ êðóïíûõ âèõ-ðåé, êîòîðûå ãåíåðèðóþò ìåëêèå, à îíè - åùå áîëåå ìåëêèå è ò.ä. Â ýòîì æå íàïðàâëåíèè èäåò ïåðåðàñïðåäåëåíèå ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè ïîòîêà. Ïîñêîëü-êó â èäåàëüíîé æèäêîñòè íåò êàêîãî-ëèáî îãðàíè÷åíèÿ, îïðåäåëÿþùåãî ìèíè-ìàëüíûé ðàçìåð âèõðÿ, ýòîò ïðîöåññ ñòðóêòóðèðîâàíèÿ ìîæíî ïðîäîëæàòü äî áåñêîíå÷íîñòè. Ñòàöèîíàðíàÿ âèõðåâàÿ ñòðóêòóðà áóäåò èìåòü ìåñòî ïðè óñ-ëîâèè, ÷òî ýíåðãèÿ, ïåðåäàâàåìàÿ â åäèíèöó âðåìåíè íà êàæäîì ìàñøòàáíîì óðîâíå, îäèíàêîâà.

Îáîçíà÷èì ðàäèóñ âèõðÿ i-ãî óðîâíÿ r_i; à åãî êèíåòè÷åñêóþ ýíåðãèþ E_i. Ïî ïîðÿäêó âåëè÷èíû $E_i \approx \rho v_i^2 r_i^3$, ãäå v_i- ñêîðîñòü äâèæåíèÿ æèäêèõ ÷àñòèö â âèõðå íà ôîíå ìàêðîñêîïè÷åñêîãî ïåðåíîñà âèõðåâîé ñòðóêòóðû. Õàðàêòåðíîå âðåìÿ ïåðåäà÷è ýíåðãèè âèõðþ îïðåäåëÿåòñÿ ïåðèîäîì îáðàùåíèÿ æèäêèõ ÷à-ñòèö â âèõðå $2\pi r_i/v_i$.

Ïðåäïîëîæèì, ÷òî âèõðè êàæäîãî ðàçìåðà çàíèìàþò îäèíàêîâóþ äîëþ îáúåìà æèäêîñòè. Òîãäà ÷èñëî âèõðåé îäíîãî ðàçìåðà áóäåò ïðîïîðöèîíàëüíî $1/r_i^3$.

Ïîòîê ýíåðãèè, ïåðåäàâàåìûé îò âèõðåé îäíîãî óðîâíÿ ê äðóãîìó, ê âèõðÿì ìåíüøåãî ðàçìåðà, äîëæåí áûòü ïðîïîðöèîíàëåí ýíåðãèè âèõðÿ, èõ ÷èñëó è îáðàòíî ïðîïîðöèîíàëåí âðåìåíè ïåðåäà÷è ýíåðãèè:

$$\rho v_i^2 r_i^3 \frac{v_i}{2\pi r_i} \frac{1}{r_i^3} = \frac{\rho v_i^3}{2\pi r_i} = const$$

$$v_i^3 \sim r_i$$

Îòñþäà ñëåäóåò, ÷òî â ñòàöèîíàðíîì ïîòîêå ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè, ïðîòå-êàþùåì ÷åðåç âèõðåâóþ ñòðóêòóðó, ñóììàðíàÿ ýíåðãèÿ âèõðåé îäíîãî ðàçìåðà áóäåò óáûâàòü ñ óìåíüøåíèåì r_i

$$\rho v_i^2 r_i^3 (1/r_i^3) = \rho v_i^2 \sim \rho r_i^{2/3} .$$

Ñóììàðíàÿ ýíåðãèÿ âñåé âèõðåâîé ñòðóêòóðû â ðàìêàõ ñäåëàííûõ ïðåäïîëîæåíèé áóäåò ïî ïîðÿäêó âåëè÷èíû ðàâíà êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèè ïîòîêà, ïîðîäèâøåãî ýòó ñòðóêòóðó. Íåñìîòðÿ íà òî, ÷òî â èäåàëüíîé æèäêîñòè îòñóòñòâóåò âÿçêîñòü, âèõðåâàÿ ñòðóêòóðà, ïîòðåáëÿÿ ýíåðãèþ è ïåðåêà÷èâàÿ åå âî âñå áîëåå ìåëêèå âèõðè, ãàñèò äâèæåíèå êðóïíîìàñøòàáíûõ âèõðåé è òîðìîçèò òîò ïîòîê, êîòîðûé âèõðè ïîðîäèë. Â öåëîì èäåàëüíàÿ æèäêîñòü ñ âèõðåâîé ñòðóêòóðîé âïîëíå ìîæåò ìîäåëèðîâàòü äâèæåíèå âÿçêîé æèäêîñòè íà ìàêðîóðîâíå.

Âèõðåâîå äâèæåíèå ìîæåò íàðóøèòü ñïëîøíîñòü æèäêîñòè. Õîòÿ ñêîðîñòü äâèæåíèÿ æèäêèõ ÷àñòèö ñ óìåíüøåíèåì ðàçìåðà âèõðÿ óìåíüøàåòñÿ ($v_i \sim r_i^{1/3}$), öåíòðîáåæíûå ñèëû $\rho(v_i^2/r_i) \sim 1/r_i^{1/3}$ ðàñòóò è ìîãóò ïðåâûñèòü íå òîëüêî äàâëåíèå â æèäêîñòè, íî è ñèëû ñöåïëåíèÿ. Â îòëè÷èå îò èäåàëüíîé æèäêîñòè âîäà, íàïðèìåð, â åñòåñòâåííûõ óñëîâèÿõ èìååò ïðî÷íîñòü íà ðàçðûâ, èçìåðÿåìóþ åäèíèöàìè êã/ñì^2.

Èäåàëüíîå òâåðäîå òåëî.

Íåäåôîðìèðóåìîå òâåðäîå òåëî èìååò òðè ïîñòóïàòåëüíûå ñòåïåíè ñâîáîäû è òðè âðàùàòåëüíûå (äëÿ òåëà ñ îñåâîé ñèììåòðèåé). Ìàêðîñêîïè÷åñêîå äâèæåíèå òâåðäîãî òåëà çàìåòíî îòëè÷àåòñÿ îò äâèæåíèÿ ìàòåðèàëüíîé òî÷êè. Äîñòàòî÷íî ñðàâíèòü äâèæåíèå ïî íàêëîííîé ïëîñêîñòè ìàòåðèàëüíîé òî÷êè è øàðèêà èëè øàðèêà è ñôåðè÷åñêîé îáîëî÷êè òîãî æå ðàçìåðà è âåñà, ÷òîáû îùóòèòü çíà÷åíèå ïðîñòðàíñòâåííîãî ðàñïðåäåëåíèÿ ìàññû â òâåðäîì òåëå. Åñëè òåëî èìååò áîëåå ñëîæíóþ ôîðìó, òî ðàñïðåäåëåíèå ýíåðãèè ìåæäó ñòåïåíÿìè ñâîáîäû ìîæåò áûòü ðàçëè÷íûì, à ïîòîìó äâèæåíèå òåëà â ïîëå ñèëû òÿæåñòè ìîæåò ýâîëþöèîíèðîâàòü âî âðåìåíè.

Äåôîðìèðóåìîå òâåðäîå òåëî èçìåíÿåò ñâîþ ôîðìó ïîä äåéñòâèåì âíåøíèõ ñèë. Ñïîñîáíîñòü ïðîòèâîäåéñòâîâàòü èçìåíåíèþ ôîðìû îáóñëîâëåíà âíóòðåííèìè ñâÿçÿìè ìåæäó ÷àñòÿìè òåëà.

Ïðè ìàëîé äåôîðìàöèè òâåðäîãî òåëà â íåì âîçíèêàþò âíóòðåííèå íàïðÿæåíèÿ, óðàâíîâåøèâàþùèå äåéñòâèå âíåøíèõ ñèë, êîòîðûå èñ÷åçàþò êàê òîëüêî ïðåêðàùàåòñÿ äåéñòâèå âíåøíèõ ñèë. Â òîì ñëó÷àå, êîãäà ñ èñ÷åçíîâåíèåì âíóòðåííèõ íàïðÿæåíèé òåëî âîññòàíàâëèâàåò ïåðâîíà÷àëüíóþ ôîðìó, èìååò ìåñòî ñîâåðøåííàÿ óïðóãîñòü òåëà.

Ñôîðìóëèðîâàííûé Ãóêîì çàêîí ëèíåéíîé ïðîïîðöèîíàëüíîñòè óïðóãèõ íàïðÿæåíèé è äåôîðìàöèé ëåã â îñíîâó ìîäåëè èäåàëüíîãî óïðóãîãî òåëà.

Âîçüìåì èçîòðîïíûé óïðóãèé êóáèê, â îäíîì èç âîñüìè óãëîâ ïîìåñòèì íà÷àëî êîîðäèíàò, à êîîðäèíàòíûå îñè íàïðàâèì âäîëü ðåáåð êóáèêà, îáîçíà÷èâ èõ x,y,z. Äåôîðìàöèÿ òàêîãî êóáèêà áóäåò õàðàêòåðèçîâàòüñÿ ñëåäóþùèìè âåëè÷èíàìè: óäëèíåíèå òåëà âäîëü îñè u_i, ïðèíèìàþùåå ïî òðåì îñÿì âèä u_x, u_y, u_z, îáîçíà÷àåò ïåðåìåùåíèå òî÷êè âíóòðè êóáèêà â íàïðàâëåíèè îäíîé èç îñåé ïðè ôèêñèðîâàííîì ïîëîæåíèè íà÷àëà êîîðäèíàò.

Îòíîñèòåëüíîå óäëèíåíèå òåëà âäîëü îñè x:

$$u_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}$$

Çàïèñü â âèäå ïðîèçâîäíîé ïðåäïîëàãàåò ñóùåñòâîâàíèå óäëèíåíèÿ ñêîëü óãîäíî ìàëîãî ïî ðàçìåðó êóáèêà. Àíàëîãè÷íî ìîæíî õàðàêòåðèçîâàòü óäëèíåíèå êóáèêà ïî äâóì äðóãèì îñÿì

$$u_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad u_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z};$$

Ðàçóìååòñÿ, óêàçàííàÿ äåôîðìàöèÿ ïðè èçìåíåíèè çíàêà íà ìèíóñ áóäåò îçíà÷àòü óêîðî÷åíèå.

Èñêàæåíèå ôîðìû êóáèêà õàðàêòåðèçóåòñÿ äåôîðìàöèåé ñäâèãà; òî÷êè, ðàñïîëîæåííûå íà ïðÿìîé ëèíèè, ïàðàëëåëüíîé îäíîé èç îñåé, íàïðèìåð x, ïî ìåðå óäàëåíèÿ îò íà÷àëà êîîðäèíàò âñå áîëåå ñìåùàþòñÿ â íàïðàâëåíèè îñè "y".

$$u_{xy} = u_{yx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}\right)$$

(Îáû÷íî èñïîëüçóåòñÿ ñèììåòðè÷íàÿ ôîðìà.)

Àíàëîãè÷íî çàïèñûâàþòñÿ îñòàëüíûå ñäâèãîâûå äåôîðìàöèè:

$$u_{xz} = u_{zx}; \; u_{zy} = u_{yz}$$

Âíóòðåííèå íàïðÿæåíèÿ â êóáèêå õàðàêòåðèçóþòñÿ ñèëàìè, êîòîðûå íóæíî ïðèëîæèòü ê ãðàíÿì êóáèêà, ÷òîáû ïîëó÷èòü èçìåðÿåìóþ äåôîðìàöèþ. Íà êàæäîé ïëîùàäêå ïîâåðõíîñòè ìîæíî çàäàòü òðè ñèëû: äåéñòâóþùóþ ïî íîðìàëè ê ïîâåðõíîñòè, êîòîðàÿ îáîçíà÷àåòñÿ íàïðàâëåíèåì íîðìàëè, è äâóìÿ âçàèìíî ïåðïåíäèêóëÿðíûìè ñèëàìè, ëåæàùèìè â ïëîñêîñòè. Îòíåñåííûå ê åäèíèöå ïëîùàäè, ýòè ñèëû íàçûâàþòñÿ íàïðÿæåíèÿìè.

Â ðàññìàòðèâàåìîì êóáèêå íà ãðàíè, íîðìàëü ê êîòîðîé íàïðàâëåíà âäîëü îñè "x", ýòè òðè íàïðÿæåíèÿ ìîæíî çàïèñàòü â âèäå: $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}$.

Ëèíåéíàÿ ñâÿçü ìåæäó íàïðÿæåíèÿìè è äåôîðìàöèÿìè â óïðóãîì òåëå Ãóêà èìååò âèä:

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}\left[(1-\sigma)u_{xx} + \sigma(u_{yy} + u_{zz})\right]$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}\left[(1-\sigma)u_{yy} + \sigma(u_{zz} + u_{xx})\right]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}\left[(1-\sigma)u_{zz} + \sigma(u_{xx} + u_{yy})\right]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{1+\sigma}u_{xy}; \sigma_{yz} = \frac{E}{1+\sigma}u_{yz}; \sigma_{zx} = \frac{E}{1+\sigma}u_{zx};$$

Ïðèâåäåì ôîðìóëû äëÿ äåôîðìàöèé ÷åðåç íàïðÿæåíèÿ, ïîëó÷àåìûå àëãåáðàè÷åñêèì ïðåîáðàçîâàíèåì ïðåäñòàâëåííûõ âûøå:

$$u_{xx} = \frac{1}{E}\left[\sigma_{xx} - \sigma(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})\right]$$
$$u_{yy} = \frac{1}{E}\left[\sigma_{yy} - \sigma(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})\right]$$
$$u_{zz} = \frac{1}{E}\left[\sigma_{zz} - \sigma(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})\right]$$

Ðèñ.1.

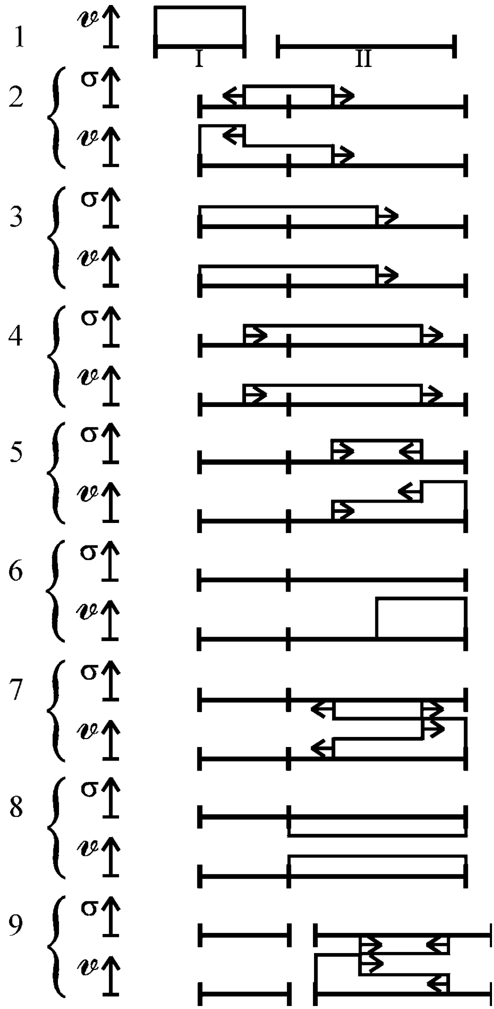
Ñòîëêíîâåíèå ñòåðæíåé I è II

Ñòåðæåíü I äâèæåòñÿ ñî ñêîðîñòüþ 2v è ñòàëêèâàåòñÿ ñî ñòåðæíåì II

Â îáîèõ ñòåðæíÿõ âîçíèêàþò óïðóãèå âîëíû, êîòîðûå òîðìîçÿò I è ðàçãîíÿþò II.

Âîëíîâîå äâèæåíèå â ïîñëåäîâàòåëüíûå ìîìåíòû âðåìåíè ïðåäñòàâëåíî ýïþðàìè ìàññîâûõ ñêîðîñòåé v è íàïðÿæåíèé S.

Íàïðàâëåíèå äâèæåíèÿ ôðîíòà âîëíû ïîêàçàíî ñòðåëî÷êàìè.



Âî âñåõ ôîðìóëàõ ñîäåðæàòñÿ äâå ýêñïåðèìåíòàëüíî îïðåäåëÿåìûå êîíñòàíòû, õàðàêòåðèçóþùèå óïðóãèå ñâîéñòâà ìàòåðèàëà: E - ìîäóëü Þíãà è σ-êîýôôèöèåíò Ïóàññîíà.

Ìîäóëü Þíãà, êàê ñëåäóåò èç ïîñëåäíèõ ôîðìóë, îïðåäåëÿåòñÿ ïóòåì ðàñòÿæåíèÿ èëè ñæàòèÿ ñòåðæíÿ, êîãäà íà áîêîâîé ïîâåðõíîñòè íåò íàïðÿæåíèé. Ïðè ðàñòÿæåíèè ïî îñè "x":

$$u_{xx} = \frac{1}{E}\sigma_{xx} \quad (\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0)$$

Â ýòèõ æå ýêñïåðèìåíòàõ îïðåäåëÿåòñÿ è êîýôôèöèåíò Ïóàññîíà: â îòñóòñòâèå áîêîâûõ íàïðÿæåíèé

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}[(1-\sigma)u_{yy} + \sigma(u_{zz} + u_{xx})] = 0$$

$$u_{yy} = u_{zz}$$

Îòñþäà ïîëó÷àåì: $u_{yy} = u_{zz} = -\sigma u_{xx}$ Ñòåðæåíü ïðè ðàñòÿæåíèè óìåíüøàåòñÿ â ïîïåðå÷íîì ñå÷åíèè òàê, ÷òî îòíîøåíèå äåôîðìàöèé ðàâíî σ. Äëÿ èçîòðîïíîé ñðåäû ýòè äâà ïàðàìåòðà ïîëíîñòüþ õàðàêòåðèçóþò óïðóãèå ñâîéñòâà. Ôèçè÷åñêè áîëåå ÿñíûìè ÿâëÿþòñÿ: ìîäóëü îáúåìíîãî ñæàòèÿ K è ìîäóëü ñäâèãà μ, êîòîðûå âûðàæàþòñÿ ÷åðåç E è σ ñëåäóþùèì îáðàçîì:

$$K = \frac{E}{3(1-2\sigma)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}.$$

Çàìåòèì, ÷òî êîýôôèöèåíò Ïóàññîíà íå ìîæåò áûòü áîëüøå 0,5, ò.ê. ïðè ýòîì çíàìåíàòåëü ôîðìóëû äëÿ îáúåìíîãî ìîäóëÿ îáðàùàåòñÿ â íóëü, à çíà÷èò, äîëæåí îáðàùàòüñÿ â íóëü è ìîäóëü Þíãà, è ìîäóëü ñäâèãà. Òâåðäîå òåëî ïåðåñòàåò áûòü òâåðäûì.

Ïëîòíîñòü âåùåñòâà è óïðóãèå ñâîéñòâà îïðåäåëÿþò ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ âîëí â òâåðäîì òåëå. Â áåçãðàíè÷íîé ñðåäå âîçìîæíû äâà âèäà âîëí: ïðîäîëüíûå, êîãäà ñìåùåíèå ÷àñòèö â âîëíå ïðîèñõîäèò â íàïðàâëåíèè ðàñïðîñòðàíåíèÿ âîëíû è ïîïåðå÷íûå, êîãäà ñìåùåíèå ÷àñòèö ïåðïåíäèêóëÿðíî ê íàïðàâëåíèþ ðàñïðîñòðàíåíèÿ âîëíû.

Ñêîðîñòü ïðîäîëüíîé âîëíû $c_l = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$

Ñêîðîñòü ïîïåðå÷íîé âîëíû $c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\sigma)}}$

Â òåëàõ êîíå÷íûõ ðàçìåðîâ ðàçëè÷íîé ôîðìû ìîãóò âîçíèêàòü ñïåöèôè÷åñêèå âîëíû, ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ êîòîðûõ ìîæåò çàìåòíî îòëè÷àòüñÿ îò ñêîðîñòåé â íåîãðàíè÷åííîé ñðåäå: ïîâåðõíîñòíûå âîëíû ðàçíûõ òèïîâ, èçãèáíûå âîëíû â ïëàñòèíàõ è ñòåðæíÿõ, êðóòèëüíûå è ò.ï.

Íà ãðàíèöàõ òåëà ïðîèñõîäèò ïðåëîìëåíèå è îòðàæåíèå âîëí, òàê ÷òî ïåðâîíà÷àëüíî ïðîñòåéøèé ïî ôîðìå âîëíîâîé èìïóëüñ, áåñêîíå÷íî îòðàæàÿñü îò ãðàíèö òåëà, âîçáóæäàåò â òåëå øèðîêèé ñïåêòð êîëåáàíèé, ñòðåìÿñü ðàñïðåäåëèòü ñâîþ ýíåðãèþ ìåæäó îãðîìíûì ÷èñëîì ñòåïåíåé ñâîáîäû òâåðäîãî òåëà. Íàäî ó÷åñòü, ÷òî âûñîêî÷àñòîòíûå êîëåáàíèÿ ìîãóò ðàññåèâàòüñÿ çåðíèñòîé ñòðóêòóðîé ïîëèêðèñòàëëè÷åñêèõ òåë, âñåâîçìîæíûìè íåîäíîðîäíîñòÿìè ñòðîåíèÿ è äåôåêòàìè ðåøåòêè êðèñòàëëîâ. Â ýòîì îòíîøåíèè ýíåðãîåìêîñòü òâåðäîãî òåëà î÷åíü âåëèêà.

Â èäåàëüíîì óïðóãîì òåëå ïîãëîùåíèå ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè íåâîçìîæíî, åñòü òîëüêî åå ðàññåÿíèå. Êîëåáàòåëüíûå äâèæåíèÿ òâåðäîãî òåëà è åãî äâè-æåíèå êàê öåëîãî îïðåäåëÿþò âñå âîçìîæíûå åãî ñîñòîÿíèÿ.

Åñëè òåëî ñâîáîäíî, ïî èíåðöèè äâèæåòñÿ â ïðîñòðàíñòâå, êèíåòè÷åñêàÿ ýíåðãèÿ åãî äâèæåíèÿ êàê öåëîãî ñîõðàíÿåòñÿ, òàê ÷òî î êîëåáàòåëüíîì äâèæå-íèè òåëà ìîæíî çàáûòü. Îäíàêî ïðè âçàèìîäåéñòâèè äâóõ òàêèõ òåë ìåæäó ñî-áîé âîçìîæíî ÷àñòü ýíåðãèè ïîñòóïàòåëüíîãî äâèæåíèÿ ïåðåäàòü âíóòðåííèì ñòåïåíÿì ñâîáîäû, òàê ÷òî âîçíèêàåò ñîìíåíèå â èäåàëüíîé óïðóãîñòè òåë. Íà ðèñ.1 â êà÷åñòâå èëëþñòðàöèè ïîêàçàí âîëíîâîé ìåõàíèçì ïåðåäà÷è ýíåðãèè ïðè ñòîëêíîâåíèè îò êîðîòêîãî ñòåðæíÿ, êîòîðûé èìåë ñêîðîñòü 2v, ê ñòåðæíþ â 2 ðàçà áîëüøåé äëèíû. Åñëè â íà÷àëüíûé ìîìåíò âñÿ ýíåðãèÿ çàêëþ÷åíà áûëà â êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèè I ñòåðæíÿ, òî â ìîìåíò èõ ðàçáåãàíèÿ ýòà ýíåð-ãèÿ îêàçàëàñü ðàñïðåäåëåíà ïîðîâíó ìåæäó êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèåé ïîñòóïà-òåëüíîãî äâèæåíèÿ è óïðóãîé ýíåðãèåé ðàñòÿíóòîãî II ñòåðæíÿ. Åñëè î ðåçóëü-òàòàõ ñîóäàðåíèÿ ñóäèòü ïî ñêîðîñòè äâèæåíèÿ öåíòðà ìàññ ñòåðæíÿ, òî îáíà-ðóæèòñÿ "ïîòåðÿ" 50% íà÷àëüíîé ýíåðãèè.

Íà÷àâøèéñÿ êîëåáàòåëüíûé ïðîöåññ âî II ñòåðæíå áóäåò íàïðàâëåí íà ðàññåÿíèå ïåðâîíà÷àëüíî ïðîñòîãî âîëíîâîãî èìïóëüñà è âîçáóæäåíèå øèðî-êîãî ñïåêòðà êîëåáàíèé, êîòîðûå â èäåàëüíîì, íå èìåþùåì ìåõàíèçìà ïîãëî-ùåíèÿ ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè òâåðäîì òåëå ñôîðìèðóþò ñî âðåìåíåì óñòîé÷è-âóþ äèíàìè÷åñêóþ ñòðóêòóðó. Â òåëàõ ïðàâèëüíîé ôîðìû áóäóò â ñïåêòðå âû-äåëÿòüñÿ ñîáñòâåííûå ÷àñòîòû òåëà è îáåðòîíà.

Ïåðåäà÷à ýíåðãèè îò íèçêî÷àñòîòíûõ êîëåáàíèé ê âûñîêî÷àñòîòíûì â èäå-àëüíûõ òâåðäûõ òåëàõ íè÷åì íå îãðàíè÷åíà. Ïîýòîìó èåðàðõè÷åñêàÿ ñòðóêòó-ðà êîëåáàíèé ñïîñîáíà "ïîãëîòèòü" áîëüøîå êîëè÷åñòâî ýíåðãèè è â ðàññìîò-ðåííîì ïðèìåðå ñòîëêíîâåíèÿ ñòåðæíåé òàêèì ïóòåì êîëåáàòåëüíûé ïðîöåññ âî II ñòåðæíå ìîæåò áûòü ïîãàøåí.

Ïðåäñòàâëÿåò áîëüøèé èíòåðåñ ñàìî ôóíêöèîíèðîâàíèå èåðàðõè÷åñêîé äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðû â ñòàöèîíàðíîì èëè êâàçèñòàöèîíàðíîì ðåæèìå, êîã-äà ïîòîê ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè, ðàñïðåäåëÿåìûé ñòðóêòóðîé, ïèòàåòñÿ îò áîëüøîãî èñòî÷íèêà, èñòîùåíèå êîòîðîãî â òå÷åíèå æèçíè ñòðóêòóðû ïðàêòè-÷åñêè íåçàìåòíî.

Ïûëåâîå îáëàêî â ñîáñòâåííîì ãðàâèòàöèîííîì ïîëå.

Íàïîìíèì, ÷òî â ñîîòâåòñòâèè ñ Çàêîíîì âñåìèðíîãî òÿãîòåíèÿ äâå ìàññû ïðèòÿãèâàþòñÿ äðóã ê äðóãó ñ ñèëîé:

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

Çäåñü G = 6,67·10^{-8} ýðã·ñì/ã^2; m è M èçìåðÿþòñÿ â ãðàììàõ, r-â ñì. è F â äèíàõ. Ñèëà âçàèìîäåéñòâèÿ íàïðàâëåíà ïî ëèíèè, ñîåäèíÿþùåé öåíòðû ìàññ.

Ãðàâèòàöèîííîå ïîëå õàðàêòåðèçóåòñÿ ïîòåíöèàëîì

$$U = -\frac{GMm}{r} \qquad \left(F = \frac{\partial U}{\partial r}\right)$$

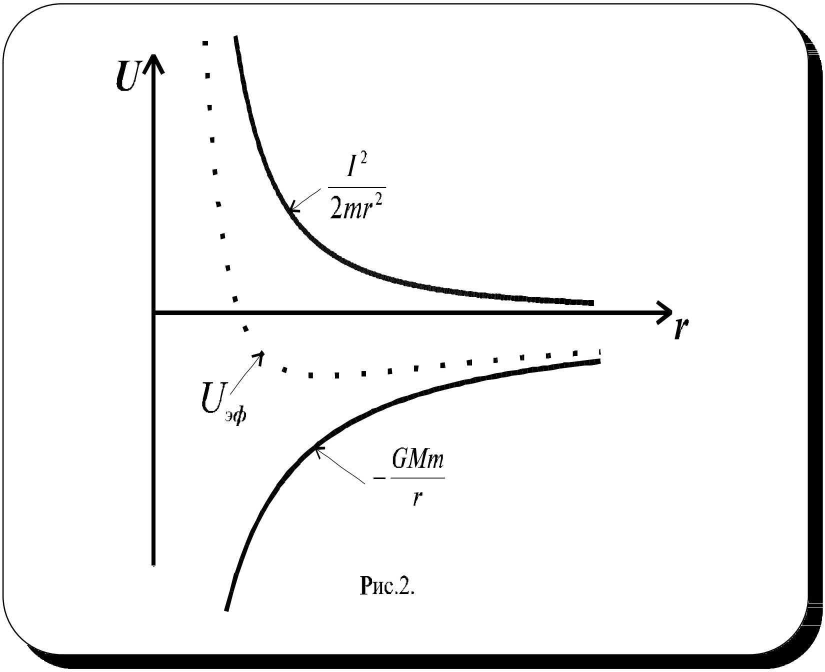


Рис.2.

Â ñëó÷àå, êîãäà $M >> m$, äâèæåíèå âçàèìîäåéñòâóþùèõ òåë óïðîùàåòñÿ: ìàññèâíîå òåëî ìîæíî ñ÷èòàòü íåïîäâèæíûì, à âñÿ êèíåòè÷åñêàÿ ýíåðãèÿ çàêëþ÷åíà â ëåãêîì òåëå. Äâèæåíèå ïîñëåäíåãî çàâèñèò îò âåëè÷èíû ìîìåíòà êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ $I = mr^2\dot{\varphi}$ ($\dot{\varphi}$ - óãëîâàÿ ñêîðîñòü).

Ãðàâèòàöèîííûå ñèëû, äåéñòâóþùèå ìåæäó ñôåðè÷åñêèìè íåäåôîðìèðóåìûìè òåëàìè, íå ìîãóò èçìåíèòü ìîìåíò êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ, òàê ÷òî ñ èçìåíåíèåì ðàññòîÿíèÿ r ÷àñòü ïîòåíöèàëüíîé ýíåðãèè îêàçûâàåòñÿ "ñâÿçàííîé" óñëîâèåì ïîñòîÿíñòâà I. Âû÷èòàÿ åå, ïîëó÷èì ýôôåêòèâíóþ ïîòåíöèàëüíóþ ýíåðãèþ:

$$U_{\text{ýô}}=\frac{1}{2}\frac{I^2}{mr^2}-\frac{GMm}{r}$$

Èçîáðàæåííàÿ íà ðèñ.2 $U_{\text{ýô}}(r)$ ñâèäåòåëüñòâóåò î âîçíèêíîâåíèè ñèë îòòàëêèâàíèÿ, êîòîðûå ïðåïÿòñòâóþò ñáëèæåíèþ òåë: ñîõðàíåíèå ìîìåíòà êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ ïðèâîäèò ê áûñòðîìó âîçðàñòàíèþ êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèè è öåíòðîáåæíûõ ñèë ïðè ñáëèæåíèè.

Åñëè ïðè çàäàííîì ìîìåíòå êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ ñóììàðíàÿ ýíåðãèÿ òåëà m (ãðàâèòàöèîííàÿ ïëþñ êèíåòè÷åñêàÿ) áîëüøå íóëÿ, òî òðàåêòîðèÿ äâèæåíèÿ åãî - ãèïåðáîëà, åñëè ðàâíà íóëþ - ïàðàáîëà, åñëè ìåíüøå íóëÿ, íî áîëüøå $U_{\text{ýô}}$ â òî÷êå ìèíèìóìà - ýëëèïñ.

Íàëè÷èå ñèë "îòòàëêèâàíèÿ" ïîçâîëÿåò âçàèìîäåéñòâóþùèì òåëàì â êîñìîñå îáìåíèâàòüñÿ ýíåðãèåé è èìïóëüñîì êàê ïðè óïðóãîì ñîóäàðåíèè àòîìîâ â ãàçå.

Ïûëåâîå îáëàêî, óäåðæèâàåìîå ñîáñòâåííûì ãðàâèòàöèîííûì ïîëåì, ïðè îïðåäåëåííûõ óñëîâèÿõ ìîæåò óïîäîáèòüñÿ èäåàëüíîìó ãàçó. Ñêîðîñòü òîíîñèòåëüíîãî äâèæåíèÿ ÷àñòèö (V) â ãàçîîáðàçíîì òåëå îïðåäåëÿåò âíóòðåííþþ ýíåðãèþ - ýíåðãèþ õàîòè÷åñêîãî äâèæåíèÿ. Ðàäèóñ ýôôåêòèâíîãî ãðàâèòàöèîííîãî âçàèìîäåéñòâèÿ ÷àñòèö (L) ìîæíî îöåíèòü èç óñëîâèÿ ðàâåíñòâà óñêîðåíèÿ òÿãîòåíèÿ è öåíòðîáåæíîãî óñêîðåíèÿ:

$$\frac{GM}{L^2} = \frac{V^2}{L};\quad L = \frac{GM}{V^2}$$

Ïðèíÿâ ïëîòíîñòü ÷àñòèö ðàâíîé ïëîòíîñòè âîäû (1 ã/ñì^3) è îáîçíà÷èâ ëèíåéíûé ðàçìåð ÷àñòèö l, ïîëó÷èì

$$L = \frac{Gl^3}{V^2}$$

Åñëè ðàäèóñ âçàèìîäåéñòâèÿ $L \leq l$, òî ãðàâèòàöèîííîå ïðèòÿæåíèå ÷àñòèö áóäåò ïðèâîäèòü ê èõ ñòîëêíîâåíèþ è ñëèïàíèþ. Òàê ïðè ñêîðîñòè 100 ñì/ñåê ðàçìåð ñëèïàþùèõñÿ ÷àñòèö áóäåò ðàâåí:

$$l = L = \frac{6{,}67\cdot 10^{-8}\cdot l^3}{10^4};\quad l^2 = 0{,}15\cdot 10^{12}$$

$l = L$ = 0,4•10^6 ñì = 4 êì.

Äëÿ âñåõ ÷àñòèö $l < L$ ïðÿìîå ñòîëêíîâåíèå ïðàêòè÷åñêè èñêëþ÷åíî, è èõ ìåõàíè÷åñêîå âçàèìîäåéñòâèå ìîæíî ðàññìàòðèâàòü êàê óïðóãîå ñîóäàðåíèå, ïðè êîòîðîì ýíåðãèÿ ñîõðàíÿåòñÿ.

Äðóãèì óñëîâèåì, îáÿçàòåëüíûì äëÿ ñóùåñòâîâàíèÿ ãàçà ÿâëÿåòñÿ èíòåíñèâíûé îáìåí ýíåðãèåé è èìïóëüñîì ìåæäó âñåìè ÷àñòèöàìè, ÷òî îáåñïå÷èâàåò ðàñïðåäåëåíèå ýíåðãèè ïî ñòåïåíÿì ñâîáîäû. Äðóãèìè ñëîâàìè, äëèíà ñâîáîäíîãî ïðîáåãà ÷àñòèö îò ñòîëêíîâåíèÿ äî ñòîëêíîâåíèÿ äîëæíà áûòü ìíîãî ìåíüøå ðàçìåðà ãàçîîáðàçíîãî òåëà. Ïîñëåäíåå óñëîâèå òðóäíîâûïîëíèìî è ìîæåò èìåòü ìåñòî â ñêîïëåíèè âåñüìà êðóïíûõ êîñìè÷åñêèõ òåë, ðàçìåðû êîòîðûõ ïðåâîñõîäÿò ìíîãèå òûñÿ÷è êèëîìåòðîâ.

Âíóòðè ýòîãî èíòåðâàëà òåëà ðàçìåðîì îò êèëîìåòðà äî 1000 êèëîìåòðîâ ìîãóò îáðàçîâûâàòü îáëàêà, äâèæåíèå êàæäîãî òåëà îïðåäåëÿåòñÿ òîëüêî ãðàâèòàöèîííûì ïîëåì îáëàêà êàê öåëîãî, à âçàèìîäåéñòâèåì ãðàâèòàöèîííûì ìåæäó òåëàìè ìîæíî ïðåíåáðå÷ü. Â èçâåñòíîì ñìûñëå äâèæåíèå òåë â òàêîì îáëàêå áóäåò ïîäîáíî äâèæåíèþ àòîìîâ â ñèëüíî ðàçðåæåííîì ãàçå, êîãäà äëèíà ñâîáîäíîãî ïðîáåãà ñîèçìåðèìà èëè áîëüøå ðàçìåðà ñîñóäà.

Â êà÷åñòâå ïðèìåðà, óäîáíîãî äëÿ êîëè÷åñòâåííûõ îöåíîê, ðàññìîòðèì ïàðàìåòðû èñõîäíîãî îáëàêà òâåðäûõ òåë èç êîòîðîãî ôîðìèðîâàëèñü ïëàíåòû Ñîëíå÷íîé ñèñòåìû.

Íåñêîëüêî îêðóãëÿÿ, ïðèìåì îáùóþ ìàññó îáëàêà (âñåõ ïëàíåò) ðàâíîé M = 2•10^{30} ã, à ìîìåíò êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ îáëàêà I = 1•10^{30} ã•ñì^2/ñ. Áóäåì ñ÷èòàòü, ÷òî ìàññà âíóòðè ñôåðè÷åñêîãî îáëàêà ðàñïðåäåëåíà ðàâíîìåðíî ñ ïëîòíîñòüþ $\bar{\rho}$.

Ñîõðàíåíèå ìîìåíòà êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ â ýòîì ñëó÷àå ïîçâîëÿåò ñâÿ-çàòü óãëîâóþ ñêîðîñòü ($\dot{\varphi}$) ñ ðàçìåðàìè R_0: $(2/5)MR_0^2\dot{\varphi} = 2\cdot10^{50}$.

Ñðåäíÿÿ êèíåòè÷åñêàÿ ýíåðãèÿ ÷àñòèö â îáëàêå, óäåðæèâàåìîì ñîáñòâåí-íûì ãðàâèòàöèîííûì ïîëåì, ðàâíà:

$$\frac{MV^2}{2} = \frac{1}{2}\cdot\frac{3}{5}\cdot\frac{GM^2}{R_0}$$

$$V_0 = \sqrt{\frac{3}{5}\cdot\frac{GM}{R_0}}$$

Åñëè òåïåðü ïðèíÿòü $\dot{\varphi} \approx V_0/R_0$, òî âûïèñàííûå âûøå ñîîòíîøåíèÿ ïî-çâîëÿò îöåíèòü îäíîâðåìåííî è R_0 è V_0:

$R_0 = 10^{18}$ ñì; $V_0 = 300$ ñì/ñ.

Ïðè ýòîì ñðåäíÿÿ ïëîòíîñòü â îáëàêå:

$$\bar{\rho} = \frac{2\cdot10^{30}}{4\cdot10^{54}} = \frac{1}{2}\cdot10^{-24} \text{ ã/ñì}^3$$

Ïîëàãàÿ ïëîòíîñòü âåùåñòâà â ÷àñòèöàõ ðàâíûì 1ã/ñì^3, îöåíèì ðàçìåðû ÷àñòèö, êîòîðûå ïðè ñòîëêíîâåíèè ñëèïàþòñÿ:

$$\frac{Gl^3}{L} = V^2;\ L = l;\ l^2 = \frac{V^2}{G} = \frac{10^5}{6{,}67\cdot10^{-8}} = \frac{3}{2}\cdot10^{12}$$

$$l \cong 10^6 \text{ ñì} = 10 \text{ êì}.$$

Ýòî âåðõíÿÿ ãðàíèöà. Áóäåì ïîëàãàòü ÷òî ýòî ìàêñèìàëüíûé ðàçìåð ÷àñ-òèö òîãî ïûëåâîãî îáëàêà, èç êîòîðîãî çàòåì ôîðìèðîâàëàñü ïëàíåòíàÿ ñèñòåìà.

Ñïåêòð ÷àñòèö ïî ðàçìåðó, âîçíèêàþùèõ ïðè äðîáëåíèè òâåðäîãî òåëà, ìî-æåò áûòü ïðåäñòàâëåí â âèäå ðàñïðåäåëåíèÿ:

$$n_i l_i^3 = n_0 l_0^3 \qquad l_0 = l_0(1 + i),$$

ãäå n_i - ÷èñëî ÷àñòèö ðàçìåðîì l_i. Ñóììàðíûå îáúåìû ÷àñòèö êàæäîé èç ôðàêöèé ðàâíû ìåæäó ñîáîé. ×èñëî òàêèõ ôðàêöèé ïîðÿäêà 10^2, òàê ÷òî ðàç-ìåð íàèìåíüøåé ÷àñòèöû îòëè÷àåòñÿ îò ðàçìåðà íàèáîëüøåé â 10^2 ðàç.

$l_{max} = 100\, l_0$.

Â ðàçðåæåííîì íà÷àëüíîì ñîñòîÿíèè îáëàêî ñàìî ïî ñåáå ýâîëþöèîíèðî-âàòü ïðàêòè÷åñêè íå ìîæåò, ò.ê. äëèíû ñâîáîäíîãî ïðîáåãà ÷àñòèö ïðåâîñõîäÿò ðàçìåð ñàìîãî îáëàêà è âñëåäñòâèå ýòîãî âçàèìîäåéñòâèåì èõ ìåæäó ñîáîé ìîæíî ïðåíåáðå÷ü.

Âåðîÿòíîñòü ñòîëêíîâåíèÿ ÷àñòèö ïðîïîðöèîíàëüíà ïëîùàäè èõ ñå÷åíèÿ (l_i^2), èõ ÷èñëó (n_i) è ñêîðîñòè èõ äâèæåíèÿ (v).

Íà äîëþ êàæäîé ôðàêöèè ïðèõîäèòñÿ ìàññà 10^{28} ã, ïðè ïëîòíîñòè 1 ã/ñì^2 ýòî 10^{28} ñì^3.

Ñóììàðíàÿ ïëîùàäü ñå÷åíèÿ ÷àñòèö ðàçìåðîì $l_0 = 10^4$ ñì:

$$l_0^2 n_0 = \frac{10^{28}}{10^4} = 10^{24} \text{ ñì}^2$$

Àíàëîãè÷íî âû÷èñëÿÿ, äëÿ íàèáîëåå êðóïíûõ ÷àñòèö ïîëó÷èì:

$$l_{\max}^2 n_{\max} = \frac{10^{28}}{10^6} = 10^{22} \quad \text{ñì}^2.$$

Ñëåäîâàòåëüíî, â ðåçóëüòàòå ñòîëêíîâåíèÿ ÷àñòèö ïðîñòðàíñòâî áóäåò î÷èùàòüñÿ îò ìåëêèõ ôðàêöèé ,à ðàçìåðû êðóïíûõ òåë áóäóò óâåëè÷èâàòüñÿ.

Íàëè÷èå ïûëåâîãî îáëàêà â íåêîòîðîì îãðàíè÷åííîì îáúåìå ñîçäàåò ãðàâèòàöèîííîå ïîëå, êîòîðîå áóäåò âòÿãèâàòü â îáëàêî èç îêðóæàþùåãî ïðîñòðàíñòâà àòîìû ïðèñóòñòâóþùèõ â íåì ãàçîâ. Ñêàïëèâàÿñü â öåíòðå îáëàêà, àòîìàðíûé ãàç ïîä äåéñòâèåì ñîáñòâåííîãî ãðàâèòàöèîííîãî ïîëÿ áóäåò ñæèìàòüñÿ è íàãðåâàòüñÿ, ôîðìèðóÿ öåíòðàëüíîå òÿæåëîå òåëî. Ïîä äåéñòâèåì ñèë òÿãîòåíèÿ ýòîãî òåëà íà÷íåò ñæèìàòüñÿ è ïûëåâîå îáëàêî, â êîòîðîì ñ óâåëè÷åíèåì ïëîòíîñòè áóäóò èíòåíñèôèöèðîâàòüñÿ ïðîöåññû àãðåãàöèè ÷àñòèö.

Èñõîäÿ èç ýòîé ïðèìèòèâíîé ñõåìû, ìîæíî îöåíèòü âðåìÿ íàêîïëåíèÿ ìàññû â öåíòðàëüíîì òÿæåëîì òåëå.

Åñëè ïëîòíîñòü àòîìàðíîãî ãàçà ðàâíà $\rho = 10^{-24}$ ã/ñì^2 è ñêîðîñòü âòåêàíèÿ åãî â îáëàêî $v = 3{\cdot}10^2$ñì/ñ, òî ìàññà, ðàâíàÿ ïî ïîðÿäêó âåëè÷èíû ìàññå Ñîëíöà, áóäåò ñîáðàíà çà âðåìÿ T.

$$4\pi R_0^2 \rho v T = 10^{33};$$

$$T = \frac{10^{33}}{4\pi\cdot 10^{36}\cdot 10^{-24}\cdot 3\cdot 10^2} \approx 0,210^{18} c \approx 10^{10} \text{ ëåò}$$

Íà ýòîì ïðèìåðå âèäíî, êàê ïûëåâûå îáëàêà, ñòàáèëüíûå ñàìè ïî ñåáå â ñîáñòâåííîì ãðàâèòàöèîííîì ïîëå, ìîãóò èíèöèèðîâàòü àêòèâíûé ýâîëþöèîííûé ïðîöåññ, ôîðìèðóÿ ãàçîîáðàçíîå òÿæåëîå òåëî â öåíòðå çàíèìàåìîãî èìè ïðîñòðàíñòâà.

Äàëüíåéøàÿ ýâîëþöèÿ ñàìîãî îáëàêà îïðåäåëÿåòñÿ ãðàâèòàöèîííûì ïîëåì òÿæåëîãî òåëà â öåíòðå, êîòîðîå ïî ìåðå ðàçîãðåâà ïðåâðàùàåòñÿ â çâåçäó. Î÷èùåíèå ïðîñòðàíñòâà îò ìåëêèõ òåë è ñîñðåäîòî÷åíèå ìîìåíòà êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ â êðóïíûõ òåëàõ ïðèâîäèò ê ñìåíå ìåõàíèçìà åãî ïåðåðàñïðåäåëåíèÿ â îáðàçóþùåéñÿ ïëàíåòàðíîé ñèñòåìå. Íà ïåðâûé ïëàí âûäâèãàþòñÿ ïðèëèâíûå ñèëû, êîòîðûå ñâÿçûâàþò ýâîëþöèþ äâèæåíèÿ òåë â êîñìîñå ñ ôîðìèðîâàíèåì èõ âíóòðåííèõ ñòðóêòóð.

Ãëàâà I. Âå÷íîå äâèæåíèå.

Âñå ìàòåðèàëüíûå òåëà â îêðóæàþùåì íàñ ïðîñòðàíñòâå íàõîäÿòñÿ â íåïðåðûâíîì äâèæåíèè: îò ãàëàêòèê äî àòîìà. Íåáåñíûå òåëà, ñâÿçàííûå ñèëàìè òÿãîòåíèÿ, îáëàäàþò îãðîìíûìè çàïàñàìè êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèè, êîòîðàÿ óâåëè÷èâàåòñÿ ïðè ñáëèæåíèè òåë. Ýíåðãèÿ îðáèòàëüíîãî äâèæåíèÿ Çåìëè ðàâíà ~$3 \cdot 10^{40}$ ýðã, à âðàùåíèÿ ~ $3 \cdot 10^{36}$ ýðã.

Äëÿ ñðàâíåíèÿ íàïîìíèì, ÷òî ýíåðãèÿ çåìëåòðÿñåíèé çà 1ãîä â ñðåäíåì ñîñòàâëÿåò ~10^{25} ýðã.

Íàõîäÿñü íà ïîâåðõíîñòè Çåìëè, íàáëþäàòåëü íå îùóùàåò ýòîãî äâèæåíèÿ. Ìåäëåííîå ïåðåìåùåíèå ïî íåáîñâîäó Ñîëíöà è çâåçä â íàøåì ñîçíàíèè íå ñâÿçûâàåòñÿ ñ òåì ôàêòîì, ÷òî îêðóæíàÿ ñêîðîñòü âðàùåíèÿ ïîðÿäêà 1000 êì/÷àñ, à îðáèòàëüíàÿ ~ 30êì/ñ.

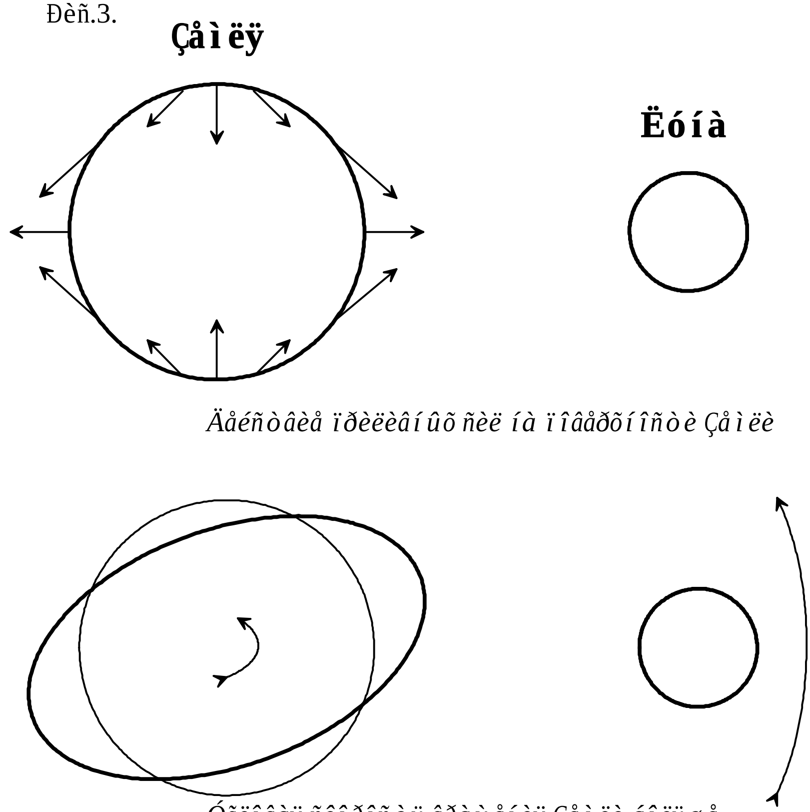
×òîáû ñòðîíóòü ìàññèâíîå òåëî ñ ìåñòà è ïðèäàòü åìó óñêîðåíèå, íóæíî ïðèëîæèòü ñèëó, äîñòàòî÷íóþ äëÿ ïðåîäîëåíèÿ ñöåïëåíèÿ, òðåíèÿ, èíåðöèè. Ïîíèìàíèå ýòîãî áëàãîäàðÿ èíæåíåðíîé ïðàêòèêå è ïîâñåäíåâíîìó îïûòó ïðî÷íî âîøëî â íàøå ñîçíàíèå.

Íà ïîâåðõíîñòè Çåìëè è â åå íåäðàõ ïåðåìåùåíèå áîëüøèõ ìàññ æèäêîé è òâåðäîé ñðåäû îñóùåñòâëÿåòñÿ áåç âèäèìûõ óñèëèé çà ñ÷åò êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèè ïëàíåòû è åå ãðàâèòàöèîííîãî ïîòåíöèàëà. Îáúåìíûå ñèëû èíåðöèè è ãðàâèòàöèè äåéñòâóþò íà êàæäóþ ÷àñòèöó, îáëàäàþùóþ ìàññîé, îäèíàêîâî, íåçàâèñèìî îò åå ïîëîæåíèÿ è ñâÿçåé ñ äðóãèìè ÷àñòèöàìè âíóòðè òåëà. Îäíàêî ñâîáîäà ïåðåìåùåíèÿ îòäåëüíîé ÷àñòèöû î÷åíü ÷àñòî îãðàíè÷åíà ïðèñóòñòâèåì ñîñåäíèõ ÷àñòèö. Åñëè ðàññìàòðèâàòü äâèæåíèå òåëà êîíå÷íîãî ðàçìåðà êàê öåëîãî, òî ñóììà äåéñòâóþùèõ íà òåëî ñèë óðàâíîâåøåíà â öåíòðå ìàññû ñèëîé èíåðöèè. Äëÿ ÷àñòåé òåëà, óäàëåííûõ îò öåíòðà ìàññ, òàêîå ðàâíîâåñèå îòñóòñòâóåò, è ñîõðàíåíèå ôîðìû òåëà îáåñïå÷èâàåòñÿ âíóòðåííèìè íàïðÿæåíèÿìè.

Òàê, íàïðèìåð, ïðè äâèæåíèè Çåìëè è Ëóíû âîêðóã îáùåãî öåíòðà ìàññ, ñèëû, ñîçäàâàåìûå ãðàâèòàöèîííûì ïîëåì Ëóíû, óðàâíîâåøåíû â öåíòðå Çåìëè öåíòðîáåæíîé ñèëîé. Âî âñåõ îñòàëüíûõ òî÷êàõ íàøåé ïëàíåòû äåéñòâóþò ñèëû, êîòîðûå ñòðåìÿòñÿ èçìåíèòü ôîðìó Çåìëè. Åñëè áû Çåìëÿ âðàùàëàñü âîêðóã ñîáñòâåííîé îñè òàê, ÷òîáû îíà áûëà îáðàùåíà ê Ëóíå îäíîé ñòîðîíîé, òî ðàíî èëè ïîçäíî ïðîèçîøëî áû òàêîå ïåðåðàñïðåäåëåíèå ìàññ âíóòðè íåå è òàêîå èçìåíåíèå åå ôîðìû, êîòîðûå ïîçâîëèëè áû óðàâíîâåñèòü ñèëû ëóííîãî ïðèòÿæåíèÿ ñèëàìè ñîáñòâåííîãî ãðàâèòàöèîííîãî ïîëÿ. Çåìëÿ îêàçàëàñü áû íåñêîëüêî âûòÿíóòîé âäîëü ëèíèè, ñîåäèíÿþùåé öåíòðû Ëóíû è Çåìëè. Íà ðèñ.3 ïîêàçàíî ñòðåëêàìè äåéñòâèå íåóðàâíîâåøåííûõ ñèë ïðèòÿæåíèÿ Ëóíû íà ïîâåðõíîñòè Çåìëè.

Ïîä äåéñòâèåì ýòèõ ñèë Çåìëÿ âûíóæäåíà äåôîðìèðîâàòüñÿ, íî ñòàòè÷åñêîå ðàâíîâåñèå ïðè ýòîì íå äîñòèãàåòñÿ, òàê êàê âñëåäñòâèå åå âðàùåíèÿ ñèëîâîå ïîëå íåïðåðûâíî ïåðåìåùàåòñÿ. Â ðåçóëüòàòå íà ïîâåðõíîñòè Çåìëè íàáëþäàþòñÿ áåãóùèå ïðèëèâíûå âîëíû. Ðåãóëÿðíûå èçìåíåíèÿ óðîâíÿ ìîðÿ âáëèçè áåðåãîâ áûëè çàìå÷åíû åùå â äðåâíåì ìèðå. Ïðèëèâíîå äâèæåíèå ðåãèñòðèðóåòñÿ ïðèáîðàìè è â çåìíîé êîðå è â àòìîñôåðå.

Ðèñ.3.



Äåéñòâèå ïðèëèâíûõ ñèë íà ïîâåðõíîñòè Çåìëè

Óãëîâàÿ ñêîðîñòü âðàùåíèÿ Çåìëè áîëüøå óãëîâîé ñêîðîñòè äâèæåíèÿ Ëóíû. Ïðèëèâíàÿ âîëíà áåæèò ïðîòèâ íàïðàâëåíèÿ âðàùåíèÿ Çåìëè è òîðìîçèò å¸, à Ëóíó óñêîðÿåò.

Äâèæåíèå ìàññ â ïðèëèâíîé âîëíå, õîòÿ è âûçâàíî äåéñòâèåì ñèë, êîòîðûå ìîãóò áûòü çàðàíåå ïðåäñêàçàíû ñ äîñòàòî÷íîé òî÷íîñòüþ, î÷åíü òðóäíî ðàññ÷èòàòü, ò.ê. íåèçâåñòíî, êàêèå îãðàíè÷åíèÿ íàêëàäûâàåò ñòðóêòóðà çåìíîé êîðû íà âîçìîæíûå ïåðåìåùåíèÿ ìàññ. Áîëåå òîãî, ìîæíî ïîëàãàòü, ÷òî ñàìè ñòðóêòóðû âîçíèêëè ïîä âîçäåéñòâèåì ïðèëèâíûõ âîëí.

Îäíî íåñîìíåííî, ÷òî ìàêñèìàëüíàÿ àìïëèòóäà ñìåùåíèé â ïðèëèâíîé âîëíå â ëþáîé òî÷êå Çåìëè áóäåò ñëåäîâàòü çà ìàêñèìóìîì ñèëîâîãî ïîëÿ ñ íåêîòîðîé çàäåðæêîé. Òàêèì îáðàçîì, ãîðáû âîëí íà ëèöåâîé è òûëüíîé ñòîðîíå áóäóò ñìåùåíû îòíîñèòåëüíî ëèíèè, ñîåäèíÿþùåé öåíòðû ìàññ Çåìëè è Ëóíû.

Âîçíèêøåå èñêàæåíèå ôîðìû Çåìëè â ïîëå òÿãîòåíèÿ Ëóíû ïîçâîëÿåò Çåìëå ïåðåäàâàòü ÷àñòü ñâîåãî ìîìåíòà êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ Ëóíå. Ïðè ýòîì âðàùåíèå Çåìëè íåñêîëüêî çàìåäëÿåòñÿ, à Ëóíà ïîñòåïåííî óäàëÿåòñÿ îò Çåìëè.

Äåôîðìàöèîííûå ïðîöåññû è äâèæåíèå, âûçâàííûå ïðèëèâíîé âîëíîé, ïîòðåáëÿþò êèíåòè÷åñêóþ ýíåðãèþ îñåâîãî âðàùåíèÿ Çåìëè â êîëè÷åñòâå 10^{27} ýðã/ãîä. Ïîòðåáëÿåìàÿ ýíåðãèÿ ðàññåèâàåòñÿ ïî ìíîãèì ðóñëàì. Ýòî è ôîðìèðîâàíèå ãåîëîãè÷åñêèõ ñòðóêòóð â çåìíîé êîðå è îêåàíè÷åñêèõ òå÷åíèé è âèõðåâûõ îáðàçîâàíèé â àòìîñôåðå. Çàïàñû êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèè, ó÷èòûâàÿ ñóùåñòâóþùèé óðîâåíü ïîòðåáëåíèÿ, ïðàêòè÷åñêè íåèñ÷åðïàåìû. Ïîñòîÿíñòâî ïîòîêà ýíåðãèè ïîääåðæèâàåò ñóùåñòâîâàíèå ñòàöèîíàðíûõ ñòðóêòóð-ïîòðåáèòåëåé ýíåðãèè.

Âåäóùóþ ðîëü â ôîðìèðîâàíèè ãåîñôåð (ÿäðî, ìàíòèÿ, ëèòîñôåðà, ãèäðîñôåðà, àòìîñôåðà) èãðàåò ïðîöåññ äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà ðàçíîé ïëîòíîñòè â ñîáñòâåííîì ãðàâèòàöèîííîì ïîëå Çåìëè. Ïðè ñðåäíåé ïëîòíîñòè âåùåñòâà $\rho=5{,}5$ã/ñì^3 ðàçëè÷èå â ïëîòíîñòè ãîðíûõ ïîðîä íà ïîâåðõíîñòè Çåìëè ($\rho=2{,}5\div3{,}0$ã/ñì^3) è ìåòàëëè÷åñêîãî ÿäðà ($\rho\approx12$ã/ñì^3) âåëèêî è ñâèäåòåëüñòâóåò î ìîùíîì ïîòîêå ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè, êîòîðûé îáåñïå÷èâàëñÿ äèôôåðåíöèàöèåé âåùåñòâà íà ïðîòÿæåíèè âñåé æèçíè Çåìëè. Îöåíêè ïîêàçûâàþò, ÷òî åãî âåëè÷èíà äîñòèãàåò ~$5\cdot10^{28}$ýðã/ãîä, ò.å. ñîâïàäàåò ñ ñîâðåìåííûìè îöåíêàìè òåïëîâîãî ïîòîêà íà ïîâåðõíîñòè Çåìëè.

Èòàê, ìåõàíè÷åñêîå äâèæåíèå ïëàíåòû îáëàäàåò îãðîìíîé ýíåðãèåé. Ýòà ýíåðãèÿ ñîçèäàåò ñòðóêòóðû ðàçíîãî ìàñøòàáà è ðàñïðåäåëÿåòñÿ èìè ïî âñåìó îáúåìó ïî ìíîãî÷èñëåííûì ðóñëàì.

Ìåõàíè÷åñêîå äâèæåíèå â Çåìëå èçíà÷àëüíî. Ãëàâíûìè âîïðîñàìè â ãåîìåõàíèêå ÿâëÿþòñÿ: Ïî÷åìó äâèæåíèå íà êàæäîì ìàñøòàáíîì óðîâíå ðåàëèçóåòñÿ â íåêîòîðîì óñòîé÷èâîì âèäå? Ïî÷åìó ýòè êâàçèñòàöèîíàðíûå äâèæåíèÿ ýâîëþöèîíèðóþò? Êàêîâû ìåõàíèçìû ðàñïðåäåëåíèÿ ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè, îáåñïå÷èâàþùèå âçàèìîñâÿçü äèíàìè÷åñêèõ ñòðóêòóð? Ïðåäñòàâëÿåòñÿ, ÷òî òîëüêî ïóòåì îñóæäåíèÿ ýòèõ âîïðîñîâ ïðèîáðåòàåòñÿ çíàíèå, íåîáõîäèìîå äëÿ ðåøåíèÿ ýêîëîãè÷åñêèõ ïðîáëåì.

Ìîæåò ïîêàçàòüñÿ, ÷òî ñòðóêòóðû òâåðäîãî òåëà îáîëî÷åê Çåìëè ñòàòè÷íû è íå ìîãóò íàõîäèòüñÿ â ãàðìîíèè ñ ýòèì âñåîáùèì äâèæåíèåì. Äåéñòâèòåëüíî, ñâîéñòâà òâåðäîãî òåëà, çàôèêñèðîâàííûå â ìîäåëè Ãóêà, íå ïîçâîëÿþò îïèñàòü òå÷åíèå ìàññ. Íî ýòî ëèøü çàñòàâëÿåò íàñ îáðàòèòüñÿ ê ìîäåëÿì ñî ñòðóêòóðîé, êîòîðûå ðàñêðûâàþò áîëåå ïîëíî ìåõàíè÷åñêèå ñâîéñòâà òâåðäûõ òåë.

Ãëàâà II. Ñòðóêòóðû òâåðäîãî òåëà

1. Äèíàìè÷åñêàÿ ñòðóêòóðà ðåàëüíîãî óïðóãîãî òåëà.

Â èäåàëüíîì óïðóãîì òåëå èçìåíåíèþ ôîðìû òåëà ïðåïÿòñòâóþò âíóòðåííèå íàïðÿæåíèÿ, êîòîðûå ëèíåéíî âîçðàñòàþò ñ äåôîðìàöèåé. Äåôîðìàöèîííûé ïðîöåññ ïðåêðàùàåòñÿ êàê òîëüêî âíóòðåííèå íàïðÿæåíèÿ ïîëíîñòüþ óðàâíîâåñÿò äåéñòâèå âíåøíèõ ñèë. Èäåàëüíîå óïðóãîå òåëî î÷åíü ïðî÷íî è íå ìîæåò ðàçðóøàòüñÿ. Â íåì îòñóòñòâóåò ìåõàíèçì ïîãëîùåíèÿ ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè, òàê ÷òî âîçáóæäåííûå êîëåáàíèÿ íå çàòóõàþò.

Â ðåàëüíûõ óïðóãèõ òåëàõ âñå óêàçàííûå ïðèçíàêè, ñòðîãî ãîâîðÿ, îòñóòñòâóþò. Íåèäåàëüíîñòü òåë ñâÿçàíà ñ äåôåêòàìè àòîìíîé ñòðóêòóðû êðèñòàëëîâ (äèñëîêàöèè è òðåùèíû). Ýòèì îáúÿñíÿåòñÿ íèçêèé ïðåäåë ïðî÷íîñòè, ïëàñòè÷åñêîå òå÷åíèå, ëîêàëüíûå íàðóøåíèÿ ñïëîøíîñòè, ïîãëîùåíèå ýíåðãèè ìàêðîêîëåáàíèé. Êðèñòàëëè÷åñêàÿ ðåøåòêà íà óðîâíå êîëåáàíèé àòîìîâ ñïîñîáíà ïîãëîùàòü áîëüøîå êîëè÷åñòâî ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè ìàêðîäâèæåíèÿ, íå âíîñÿ ïðè ýòîì ñóùåñòâåííûõ èçìåíåíèé â ìåõàíè÷åñêèå ñâîéñòâà òâåðäûõ òåë.

Íåîáõîäèìîñòü ó÷åòà ñòðóêòóðíûõ ïàðàìåòðîâ òâåðäîãî òåëà óæå äàâíî ñòàëà î÷åâèäíîé. Áûëè ââåäåíû âñåâîçìîæíûå ïîïðàâêè è îãðàíè÷åíèÿ íà ïðèìåíåíèå ìîäåëè èäåàëüíîãî òâåðäîãî òåëà: ïðåäåë óïðóãîñòè, ïîêàçàòåëè ïîãëîùåíèÿ óïðóãèõ êîëåáàíèé, ïðåäåë ïðî÷íîñòè ïðè ñòàòè÷åñêèõ è äèíàìè÷åñêèõ íàãðóçêàõ è ò.ï. Òàêîé ïóòü ñîãëàñîâàíèÿ ìîäåëè è ðåàëüíîãî òåëà äëÿ ìàøèíîñòðîåíèÿ îêàçàëñÿ äîñòàòî÷íî ýôôåêòèâíûì, ò.ê. âñå êîíñòðóêöèè ðàáîòàþò, íå âûõîäÿ çà ïðåäåëû ìàëûõ, óïðóãèõ äåôîðìàöèé. Åñëè æå îáðàòèòüñÿ ê ãîðíûì ïîðîäàì è ìàññèâàì, òî ëåãêî â íèõ îáíàðóæèòü ìíîæåñòâî ñàìûõ ðàçíîîáðàçíûõ äåôåêòîâ è íåîäíîðîäíîñòåé. Èçó÷åíèþ è êëàññèôèêàöèè ñòðóêòóðíûõ îñîáåííîñòåé ìàññèâîâ ãîðíûõ ïîðîä ïîñâÿùåíî ìíîãî èññëåäîâàíèé.

Ðàçíîîáðàçèå è ðàçíîìàñøòàáíîñòü ñòðóêòóð, êàçàëîñü, îáðåêàþò íà íåóäà÷ó âñÿêóþ ïîïûòêó íàéòè èõ îáîáùåííûé îáðàç, íå ïåðåãðóæåííûé îáèëèåì ýìïèðè÷åñêèõ ñâåäåíèé. Ïðåîäîëåíèþ ýòîé òðóäíîñòè ñïîñîáñòâîâàëî òî, ÷òî ïðè îäíîðîäíîé äåôîðìàöèè ñ ïîñòîÿííîé ñêîðîñòüþ òîëüêî íåáîëüøàÿ ÷àñòü äåôåêòîâ òâåðäîãî òåëà ïðèíèìàåò â ïðîöåññå àêòèâíîå ó÷àñòèå, îñòàëüíûå âîîáùå íèêàê ñåáÿ íå ïðîÿâëÿþò è, ñëåäîâàòåëüíî, íå ìîãóò ïîâëèÿòü íà ìåõàíè÷åñêèå ñâîéñòâà òâåðäîãî òåëà. Ðàçóìååòñÿ, ïðè èçìåíåíèè ñêîðîñòè è âèäà äåôîðìàöèè èçìåíÿåòñÿ è ñòðóêòóðà ìåõàíè÷åñêè çíà÷èìûõ íåîäíîðîäíîñòåé. Ïîòðåáîâàëîñü ðàçðàáîòàòü ïðîöåäóðó îïðåäåëåíèÿ ïàðàìåòðîâ ìåõàíè÷åñêè çíà÷èìûõ ñòðóêòóð â ðåàëüíûõ òâåðäûõ òåëàõ è íàó÷èòüñÿ ìîäåëèðîâàòü ýòè ñòðóêòóðû.

Ðàçâèâàÿ ôåíîìåíîëîãè÷åñêè èäåþ äåôåêòíîñòè êðèñòàëëè÷åñêîé ðåøåòêè, óäàëîñü ïîñòðîèòü ìîäåëü òâåðäîãî òåëà, êîòîðàÿ â îáùèõ ÷åðòàõ ó÷èòûâàëà ñòðóêòóðíûå îñîáåííîñòè ðåàëüíûõ òâåðäûõ òåë.

Ðàçúÿñíèì îñíîâíûå ïîëîæåíèÿ ìîäåëè. Â èçîòðîïíîå óïðóãîå òåëî Ãóêà âíåäðåíû ñôåðè÷åñêèå ôîðìû íåîäíîðîäíîñòè ðàçíîãî ðàçìåðà.

Íåîäíîðîäíîñòè êàæäîãî ðàçìåðà ðàñïðåäåëåíû â îáúåìå òåëà ðàâíîìåðíî, íî íå îáÿçàòåëüíî ðåãóëÿðíî. Ðàñïðåäåëåíèå íåîäíîðîäíîñòåé ïî ðàçìåðó âûáðàíî òàêèì, ÷òîáû òåëà ðàçíîé âåëè÷èíû èìåëè ïîäîáíóþ ñòðóêòóðó:

$$\frac{l^3 dn}{d\ln l} = \alpha$$

l - ðàçìåð íåîäíîðîäíîñòåé;

n - ÷èñëî íåîäíîðîäíîñòåé ðàçìåðà l â åäèíèöå îáúåìà;

α - êîíñòàíòà, õàðàêòåðèçóþùàÿ äåôåêòíîñòü òâåðäîãî òåëà.

Ôîðìóëà óòâåðæäàåò, ÷òî â òåëå ñóììàðíûå îáúåìû íåîäíîðîäíîñòåé êàæäîãî ðàçìåðà îäèíàêîâû è çàíèìàþò ìàëóþ äîëþ ïðîñòðàíñòâà, êîòîðàÿ îáîçíà÷åíà áóêâîé α.

Èíîãäà óäîáíî ïîëüçîâàòüñÿ íåîäíîðîäíîñòÿìè, ðàçìåðû êîòîðûõ ïðåäñòàâëÿþò äèñêðåòíûé ðÿä, íàïðèìåð:

$$\frac{l_{i+1}}{l_1} = 2^i$$

Â ýòîì ñëó÷àå ôîðìóëà ðàñïðåäåëåíèÿ íåîäíîðîäíîñòåé ïî ðàçìåðó ïðèîáðåòàåò âèä: $l_i^3 n_i = \alpha$, ãäå i ïðîáåãàåò âñå çíà÷åíèÿ ÷èñëîâîãî ðÿäà (ïîëîæèòåëüíûå è îòðèöàòåëüíûå). ×èòàòåëü íå äîëæåí ñìóùàòüñÿ òåì, ÷òî îáùèé îáúåì âñåõ íåîäíîðîäíîñòåé ìîæåò ïðåâîñõîäèòü îáúåì òåëà, ò.ê. ìåëêèå íåîäíîðîäíîñòè âõîäÿò â îáúåì êðóïíûõ è ñîïîñòàâëåíèå ñ îáúåìîì òåëà íå èìååò ñìûñëà.

Êàêèìè æå ìåõàíè÷åñêèìè ñâîéñòâàìè ñëåäóåò íàäåëèòü ýòè âêëþ÷åíèÿ â óïðóãîå òåëî, êîòîðûå áûëè îáîçíà÷åíû êàê íåîäíîðîäíîñòè? ×òîáû êîíòðàñòèðîâàòü ñ óïðóãèì òåëîì, "íåîäíîðîäíîñòè" äîëæíû äîïóñêàòü íåîáðàòèìîå èçìåíåíèå ôîðìû ïðè ëþáûõ ñêîëü óãîäíî ìàëûõ íàïðÿæåíèÿõ. Ñ äðóãîé ñòîðîíû, ýòà ñïîñîáíîñòü íåîäíîðîäíîñòåé äîëæíà ðåãóëèðîâàòüñÿ äåôîðìàöèîííûì ïðîöåññîì â òâåðäîì òåëå âïëîòü äî âîçíèêíîâåíèÿ ó "íåîäíîðîäíîñòè" óïðóãèõ ñâîéñòâ. Òàêîå ìåõàíè÷åñêîå ïîâåäåíèå íåîäíîðîäíîñòè ìîæíî âîîáðàçèòü, åñëè â îáúåìå íåîäíîðîäíîñòè, êîòîðàÿ äåôîðìèðóåòñÿ êàê âñå òâåðäîå òåëî, âîçíèêàþò èçáûòî÷íûå íàïðÿæåíèÿ ñäâèãà (îáúåì íåîäíîðîäíîñòè ïðè äåôîðìèðîâàíèè îñòàåòñÿ íåèçìåííûì) è ýòè ñäâèãîâûå íàïðÿæåíèÿ îñëàáåâàþò (ðåëàêñèðóþò) ñàìè ñîáîé ñî âðåìåíåì. Íà óðîâíå êðèñòàëëè÷åñêîé ðåøåòêè ïîäîáíûå ÿâëåíèÿ â îêðåñòíîñòè äåôåêòà ìîãóò áûòü ôèçè÷åñêè îáîñíîâàíû, à íàøåé ìîäåëè îíè ïîñòóëèðóþòñÿ äëÿ âñåõ ìàñøòàáíûõ óðîâíåé.

Ïîñêîëüêó ðåëàêñàöèÿ íàïðÿæåíèé ïðîòåêàåò âî âðåìåíè, ðåãóëèðóþùèì ïàðàìåòðîì óäîáíî âûáðàòü ñêîðîñòü äåôîðìàöèè $(\dot{\varepsilon})$.

Êîíêóðåíöèÿ äâóõ ïðîöåññîâ: êîíöåíòðàöèè èçáûòî÷íûõ íàïðÿæåíèé è ðåëàêñàöèè èõ ïðè çàäàííîé ñêîðîñòè äåôîðìàöèè òåëà îïðåäåëÿåò íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ è ïîçâîëÿåò âûÿâèòü ñòðóêòóðó, çíà÷èìóþ äëÿ õàðàêòåðèñòèêè ìåõàíè÷åñêèõ ñâîéñòâ òâåðäîãî òåëà. Ñîîòâåòñòâóþùåå óðàâíåíèå èìååò âèä:

$$\frac{d\Delta\sigma_l}{dt} = \rho c_t^2 \dot{\varepsilon} - \nu \frac{\Delta\sigma_l}{l};$$

$\Delta\sigma_l$ - èçáûòî÷íîå íàïðÿæåíèå íà íåîäíîðîäíîñòè ðàçìåðà l;

$\rho c_t^2 = \mu$ - ïðîèçâåäåíèå ïëîòíîñòè òåëà íà ñêîðîñòü ïîïåðå÷íûõ âîëí â íåì, ðàâíîå ïî îïðåäåëåíèþ ìîäóëþ ñäâèãà;

$\dot{\varepsilon}$ - ñêîðîñòü ñäâèãîâûõ äåôîðìàöèé â òâåðäîì òåëå;

v - ñêîðîñòü ðåëàêñàöèè íàïðÿæåíèÿ, âåëè÷èíà êîòîðîé äëÿ âñåõ ãîðíûõ ïîðîä ïðèíÿòà îäèíàêîâîé $v = 2 \cdot 10^{-6}$ ñì/c.

Ïðîèíòåãðèðîâàâ óðàâíåíèå ïðè ïîñòîÿííîé ñêîðîñòè äåôîðìàöèè, ïîëó÷èì çíà÷åíèÿ íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ ðàçíîãî ðàçìåðà:

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\varepsilon} \tfrac{l}{v}[1 - e^{-vt/l}].$$

Ðàçóìååòñÿ, äåôîðìèðîâàíèå ñ ïîñòîÿííîé ñêîðîñòüþ ïðîèñõîäèò â òå÷åíèå îãðàíè÷åííîãî âðåìåíè, ïîêà íå äîñòèãíóò ïðåäåë óïðóãîñòè òåëà. Äåôîðìàöèè ïðèðîäíûõ êðóïíîìàñøòàáíûõ òåë èìåþò íåáîëüøóþ ñêîðîñòü ~ $10^{-5} \div 10^{-7}$ 1/ãîä, òàê ÷òî èíòåðâàë âðåìåíè, â òå÷åíèå êîòîðîãî ñêîðîñòü ìîæåò áûòü ïîñòîÿííîé, êîëåáëåòñÿ â ïðåäåëàõ 100 - 10000 ëåò. Ïðàêòè÷åñêè íàì íèêîãäà íå èçâåñòíî, êîãäà íà÷àëñÿ òîò äåôîðìàöèîííûé ïðîöåññ, êîòîðûì îõâà÷åí â íàñòîÿùèé ìîìåíò èíòåðåñóþùèé íàñ ìàññèâ. Âûáðàâ ïðîèçâîëüíî âðåìÿ t, îïðåäåëèì íåêîòîðîå çíà÷åíèå $l^* = vt$, êîòîðîå ðàçäåëÿåò âñå íåîäíîðîäíîñòè íà äâå ãðóïïû:

äëÿ $l < l^*$

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\varepsilon} \frac{l}{v}$$

Íàïðÿæåíèÿ íà ìåëêèõ íåîäíîðîäíîñòÿõ âñëåäñòâèå íåïðåðûâíîé ðåëàêñàöèè îñòàþòñÿ íà îäíîì óðîâíå: ÷åì áîëüøå íåîäíîðîäíîñòü, òåì âûøå íàïðÿæåíèÿ.

Äëÿ $l > l^*$

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\varepsilon} \frac{l}{v}[1 - (1 - \frac{vt}{l})] = \rho c_t^2 \dot{\varepsilon} t.$$

Íàïðÿæåíèÿ íà êðóïíûõ íåîäíîðîäíîñòÿõ íå óñïåâàþò ðåëàêñèðîâàòü è ðàñòóò ñî âðåìåíåì òàê æå, êàê è âî âñåì òåëå.

Îòñþäà ñëåäóåò, ÷òî ñòðóêòóðà ìåõàíè÷åñêè çíà÷èìûõ íåîäíîðîäíîñòåé ñî âðåìåíåì ìåíÿåòñÿ: îïðåäåëÿþùèé ðàçìåð íåîäíîðîäíîñòåé $l^* = vt$. Íà ìåëêèõ ($l << l^*$) íåò íàïðÿæåíèé, à íà áîëüøèõ ($l > l^*$) íåò ðåëàêñàöèè.

Â èäåàëüíî óïðóãîì òåëå íàïðÿæåíèÿ îäíîçíà÷íî ñâÿçàíû ñ äåôîðìàöèåé. Ñðåäè îïðåäåëÿþùèõ ïàðàìåòðîâ íåò õàðàêòåðèñòè÷åñêèõ âåëè÷èí ñ ðàçìåðíîñòüþ äëèíû è ïîýòîìó íàïðÿæåííî-äåôîðìàöèîííîå ñîñòîÿíèå ãåîìåòðè÷åñêè ïîäîáíûõ òåë îäèíàêîâî. Â ðåàëüíûõ òåëàõ ñî ñòðóêòóðîé ïîäîáèå áóäåò èìåòü ìåñòî òîëüêî â òîì ñëó÷àå, åñëè ïîäîáíû äèíàìè÷åñêèå ñòðóêòóðû. Íàïîìíèì, ÷òî èåðàðõèÿ íåîäíîðîäíîñòåé â òâåðäîì òåëå â ñîîòâåòñòâèè ñ ïðèíÿòîé ôîðìóëîé èõ ðàñïðåäåëåíèÿ ïî ðàçìåðàì îáåñïå÷èâàåò ãåîìåòðè÷åñêîå ïîäîáèå òåë ðàçíîãî ðàçìåðà.

×òî êàñàåòñÿ äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðû íàïðÿæåííûõ íåîäíîðîäíîñòåé, òî îíà çàâèñèò îò ñêîðîñòè äåôîðìàöèè (ðàçìåðíîñòü[$\dot{\varepsilon}$] = c^{-1}). Ó÷èòûâàÿ, ÷òî ñðåäè ïàðàìåòðîâ, õàðàêòåðèçóþùèõ ìåõàíè÷åñêèå ñâîéñòâà òåëà, ïîÿâèëàñü ñêîðîñòü ðåëàêñàöèè v = 2•10^{-6}ì/ñ, óñëîâèåì ãåîìåòðè÷åñêîãî ïîäîáèÿ ñòðóêòóð â ïîäîáíûõ òåëàõ ÿâëÿåòñÿ:

$$\frac{L\dot{\varepsilon}}{v} = \text{const};$$ L - ðàçìåð òåëà.

Èòàê, ïîäîáèå ìåõàíè÷åñêèõ ñîñòîÿíèé äâóõ òåë ðàçíîé âåëè÷èíû (L) áóäåò èìåòü ìåñòî, åñëè ñàìè òåëà ãåîìåòðè÷åñêè ïîäîáíû, ñêîðîñòè äåôîðìàöèè â íèõ îáðàòíî ïðîïîðöèîíàëüíû èõ ðàçìåðàì $(\dot{\varepsilon}_I/\dot{\varepsilon}_{II} = L_{II}/L_I)$ è ìîìåíòû âðåìåíè îò íà÷àëà äåôîðìàöèîííîãî ïðîöåññà â íèõ ïðîïîðöèîíàëüíû èõ ðàçìåðàì $(t_I/t_{II} = L_I/L_{II})$.

Îáðàòèì âíèìàíèå åùå íà îäèí áåçðàçìåðíûé ïàðàìåòð α, êîòîðûé ðàâåí ñóììàðíîìó îáúåìó íåîäíîðîäíîñòåé îäíîãî ðàçìåðà, îòíåñåííîìó ê îáúåìó òåëà. Åñëè ââåñòè îáúåì ó÷àñòêà òåëà, ïðèõîäÿùèéñÿ íà îäíó íåîäíîðîäíîñòü çàäàííîãî ðàçìåðà, òî îí îïðåäåëèòñÿ ñîîòíîøåíèåì: $a_i^3 = l_i^3/\alpha$, ãäå a_i - ðàññòîÿíèå ìåæäó íåîäíîðîäíîñòÿìè. Ðàññòîÿíèå ìåæäó íåîäíîðîäíîñòÿìè (l*) ñîîòâåòñòâåííî áóäóò ðàâíû $a^* = l^*/\alpha^{1/3}$. Èìååò ñìûñë ñîïîñòàâèòü ðàçìåðû òåëà L è a*.

Â òåëàõ îòíîñèòåëüíî íåáîëüøîãî ðàçìåðà, äåôîðìèðóåìûõ ñ ìàëîé ñêîðîñòüþ ($\dot{\varepsilon}$ = const), ðàñòóùåå ñî âðåìåíåì $a*(t)$ ìîæåò ïðåâûñèòü ðàçìåðû òåëà L. Ýòî çíà÷èò, ÷òî íà âñåõ íåîäíîðîäíîñòÿõ ïðåêðàòèëñÿ ðîñò íàïðÿæåíèé è ðîëü äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðû â äàëüíåéøåì äåôîðìàöèîííîì ïðîöåññå áóäåò ìàëîçàìåòíîé.

Ê ýòîìó íóæíî äîáàâèòü, ÷òî èçáûòî÷íûå íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ áóäóò ñîõðàíÿòüñÿ íå òîëüêî â òå÷åíèå âñåãî ïðîöåññà äåôîðìèðîâàíèÿ, íî è ïîñëå åãî îêîí÷àíèÿ, õîòÿ è áóäóò ïîñòåïåííî óìåíüøàòüñÿ. Îñîáî íàäî ïîä÷åðêíóòü, ÷òî ýòè íàïðÿæåíèÿ íå èñ÷åçíóò ñðàçó äàæå òîãäà, êîãäà óïðóãîå òåëî áóäåò ïîëíîñòüþ îñâîáîæäåíî îò íàãðóçêè.

Èåðàðõèÿ ðàçíîìàñøòàáíûõ íåîäíîðîäíîñòåé îáíàðóæèâàåò ñåáÿ â ìåõàíè÷åñêèõ ñâîéñòâàõ òâåðäûõ òåë, êîòîðûå âûãëÿäÿò ïàðàäîêñàëüíûìè.

Çàòóõàíèå óïðóãèõ âîëí ìîæíî õàðàêòåðèçîâàòü îòíîøåíèåì àìïëèòóä íà êîíöàõ îòðåçêà ïóòè, ðàâíîãî äëèíå âîëíû l. Îáû÷íî çàòóõàíèå îïèñûâàåòñÿ ýêñïîíåíòîé:

$$A=A_0exp(-\gamma x)f(x - c/t);$$ c - ñêîðîñòü óïðóãèõ âîëí.

Ëîãàðèôì îòíîøåíèÿ àìïëèòóä íà îòðåçêå ïóòè l íàçûâàþò ëîãàðèôìè÷åñêèì äåêðåìåíòîì δ:

$$\delta = \lg\frac{A}{A_0} = \gamma\lambda = \gamma\frac{C}{A}$$

Ýíåðãèÿ âîëíû ïðîïîðöèîíàëüíà êâàäðàòó àìïëèòóäû, òàê ÷òî ïîòåðÿ ýíåðãèè âîëíîé íà îòðåçêå $x = \lambda$:

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\sigma = 2\gamma\frac{C}{A} = \frac{2\pi}{Q}$$

Q íàçûâàþò äîáðîòíîñòüþ ìàòåðèàëà; â äàëüíåéøåì îíà áóäåò èñïîëüçîâàòüñÿ äëÿ õàðàêòåðèñòèêè ãîðíûõ ïîðîä.

Ýêñïåðèìåíòàëüíî óñòàíîâëåíî ïîðàçèòåëüíîå ñâîéñòâî ãîðíûõ ïîðîä: äåêðåìåíò çàòóõàíèÿ (èëè äîáðîòíîñòü) â íèõ íå çàâèñèò îò ÷àñòîòû êîëåáàíèé. Ýòî çíà÷èò, ÷òî ïîãëîùåíèå ýíåðãèè ïðè ðàñïðîñòðàíåíèè óïðóãèõ âîëí ðàçíîé äëèíû áóäåò îäèíàêîâûì íà ïóòè, ïðîïîðöèîíàëüíîì äëèíå âîëíû. Â ðàìêàõ êîíòèíóàëüíîé ìîäåëè òâåðäîãî òåëà, áåçäåôåêòíîé è ñ äåôåêòàìè îäíîãî ðàçìåðà, îáúÿñíèòü ýòî ñâîéñòâî íå ïðåäñòàâëÿåòñÿ âîçìîæíûì. Äåëî îáñòîèò òàê, ñëîâíî óïðóãèå âîëíû ðàçíîé äëèíû "âûáèðàþò" äëÿ ñåáÿ ïîäõîäÿùóþ ïî ìàñøòàáó ñòðóêòóðó â òâåðäîì òåëå è òîëüêî ñ íåé è âçàèìîäåéñòâóþò.

Ðàññìîòðåííûå âûøå äèíàìè÷åñêèå ñòðóêòóðû, âîçíèêàþùèå ïðè äåôîðìèðîâàíèè òâåðäîãî òåëà ñ íåîäíîðîäíîñòÿìè, îáúÿñíÿþò ýòî ñâîéñòâî ãîðíûõ ïîðîä. Ïðîâåäÿ ñîîòâåòñòâóþùèå ìàòåìàòè÷åñêèå îïåðàöèè, êîòîðûå çäåñü îïóñòèì, ìîæíî ïîñòàâèòü â ñîîòâåòñòâèå ïðèíÿòûå âûøå ïàðàìåòðû ìîäåëè òâåðäîãî òåëà ñ íåîäíîðîäíîñòÿìè è ýìïèðè÷åñêèé êîýôôèöèåíò äîáðîòíîñòè Q. Îêàçàëîñü, ÷òî äîáðîòíîñòü îäíîçíà÷íî îïðåäåëÿåòñÿ ñóììàðíûì îáúåìîì íåîäíîðîäíîñòåé îäíîãî ðàçìåðà (α):

$$\frac{l^3 dn}{d\ln l} = \alpha = \frac{2}{\pi \cdot Q}$$

Òàêèì îáðàçîì, òðóäíàÿ çàäà÷à âûÿâëåíèÿ ðàñïðåäåëåíèÿ ìåõàíè÷åñêè çíà÷èìûõ íåîäíîðîäíîñòåé â ðåàëüíûõ òåëàõ ïîëó÷èëà ðàçðåøåíèå â ïðîñòîé, äàâíî èçâåñòíîé ïðîöåäóðå îïðåäåëåíèÿ äîáðîòíîñòè Q ìàòåðèàëà.

Óìåñòíî çäåñü ñêàçàòü î ðàçëè÷èè ìàñøòàáîâ ñòðóêòóð, êîòîðûå îòâåòñòâåííû çà ïîãëîùåíèå ýíåðãèè óïðóãèõ âîëí è çà ðàññåÿíèå óïðóãèõ âîëí. Íàèáîëåå ýôôåêòèâíî ðàññåÿíèå âîëí ïðîèñõîäèò íà íåîäíîðîäíîñòÿõ, ðàçìåðû êîòîðûõ ñîèçìåðèìû ñ äëèíîé âîëíû. ×òî êàñàåòñÿ íåîäíîðîäíîñòåé, íà êîòîðûõ ïðîèñõîäèò äèññèïàöèÿ ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè, òî èõ ðàçìåðû l äîëæíû áûòü ïîðÿäêà $l^* = vT = v\frac{\lambda}{c}$, ò.å. ïðèìåðíî â 10^{11} ðàç ìåíüøå. Òàê, íàïðèìåð, óïðóãàÿ âîëíà äëèíîé ~ 500ì (f=10Ãö) áóäåò äèññèïèðîâàòü ñâîþ ýíåðãèþ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ l^* ~ 10^{-6} ñì.

Îòñþäà ñëåäóåò, ÷òî ñåéñìè÷åñêèå êîëåáàíèÿ, èìåþùèå áûòü ïîâñþäó è ïîñòîÿííî, ñïîñîáíû àêòèâèçèðîâàòü ïðîöåññû â ãîðíûõ ïîðîäàõ íà ìèêðîóðîâíå.

2. Ñòðóêòóðà ðàçðóøåíèÿ òâåðäîãî òåëà.

Ðàçðóøåíèå, êîòîðîå èìååò ìåñòî â îáúåìå òâåðäîãî òåëà ïðè åãî îäíîðîäíîé äåôîðìàöèè, õàðàêòåðèçóåòñÿ ñðåäíèì ðàçìåðîì êóñêà (áëîêà, îòäåëüíîñòè) è ãðàíóëîìåòðè÷åñêèì ñîñòàâîì, ò.å. ðàñïðåäåëåíèåì êóñêîâ ïî ðàçìåðó. Îáðàçîâàíèå ìíîæåñòâà ðàçíîðàçìåðíûõ êóñêîâ â îáúåìå òâåðäîãî òåëà, êîãäà äåôîðìàöèÿ â êàæäîé òî÷êå îäèíàêîâà, ïðåäñòàâëÿåòñÿ äîâîëüíî ñëîæíûì ïðîöåññîì. Ìîæíî ïðåäëîæèòü ïî êðàéíåé ìåðå äâà âàðèàíòà åãî ðåàëèçàöèè.

Ïðè ìåäëåííîì ðàçâèòèè ñíà÷àëà âîçíèêøèå åäèíè÷íûå òðåùèíû îáðàçóþò âíóòðè òåëà êðóïíûå áëîêè, êîòîðûå ïðè íàðàñòàíèè äåôîðìàöèè äðîáÿòñÿ íà áîëåå ìåëêèå. Â ýòîì ñëó÷àå ýíåðãèÿ, ïîòðåáíàÿ äëÿ ðàçðóøåíèÿ, äîëæíà íåïðåðûâíî ïîñòóïàòü â äåôîðìèðóåìûé îáúåì.

Ïðè áûñòðîì äåôîðìèðîâàíèè, ó÷èòûâàÿ, ÷òî ðàçðóøåíèå îïðåäåëÿåòñÿ ñêîðîñòüþ ðàñïðîñòðàíåíèÿ òðåùèí, êîòîðàÿ ìåíüøå ñêîðîñòè ðàñïðîñòðàíåíèÿ ïðîäîëüíûõ âîëí â óïðóãîì òåëå, ìîæíî ñîçäàòü â îáúåìå òåëà çàïàñ óïðóãîé ýíåðãèè, äîñòàòî÷íîé äëÿ ðàçðóøåíèÿ åãî íà ìåëêèå êóñêè. Â ýòîì ñëó÷àå â òâåðäîì òåëå îáðàçóåòñÿ ìíîæåñòâî çàðîäûøåé òðåùèí, êîòîðûå ïðè ïðîðàñòàíèè, ñëó÷àéíî ïåðåñåêàÿñü, îäíîâðåìåííî ôîðìèðóþò êóñêè ðàçíîãî ðàçìåðà. Ïîñòóïëåíèåì ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè â ýòîò ïåðèîä ìîæíî ïðåíåáðå÷ü. Åñòåñòâåííî îæèäàòü, ÷òî êàæäûé èç âàðèàíòîâ ðàçðóøåíèÿ áóäåò îòëè÷àòüñÿ ñâîèì ãðàíóëîìåòðè÷åñêèì ñîñòàâîì êóñêîâ.

Êàê ïîêàçàëè ýêñïåðèìåíòû, äåéñòâèòåëüíî, ïîñëåäîâàòåëüíîå äðîáëåíèå êóñêîâ â øàðîâûõ ìåëüíèöàõ (ãîðíàÿ ïîðîäà âî âðàùàþùèõñÿ áàðàáàíàõ äðîáèòñÿ ìåòàëëè÷åñêèìè øàðàìè) äàåò ëîãíîðìàëüíîå ðàñïðåäåëåíèå êóñêîâ ïî êðóïíîñòè, à äðîáëåíèå âî âçðûâíîé âîëíå - ðàñïðåäåëåíèå Âåéáóëëà.

Ñðåäíèé ðàçìåð êóñêà ïî îáîèì âàðèàíòàì ðàçðóøåíèÿ çàâèñèò îò çàòðà÷åííîé ýíåðãèè íà äðîáëåíèå â åäèíèöå îáúåìà òåëà: ÷åì îíà áîëüøå, òåì ìåíüøå ñðåäíèé ðàçìåð êóñêà. Ïîïûòêè óñòàíîâèòü êîëè÷åñòâåííûå ñîîòíîøåíèÿ, èñõîäÿ èç ïðåäñòàâëåíèé î òîæäåñòâåííîñòè ýíåðãèè äðîáëåíèÿ è ýíåðãèè îáðàçîâàíèÿ íîâîé ïîâåðõíîñòè, îêàçàëèñü áåçóñïåøíûìè êàê âñëåäñòâèå ìåòîäè÷åñêèõ òðóäíîñòåé îöåíêè îáùåé ïîâåðõíîñòè îáðàçîâàííûõ ìåëêèõ ÷àñòèö, òàê è âñëåäñòâèå íåîïðåäåëåííîñòè ñàìîé âåëè÷èíû ïîâåðõíîñòíîé ýíåðãèè ðåàëüíûõ òåë.

Íåîäíîðîäíîñòè â ïðèðîäíûõ òåëàõ îêàçûâàþò ïåðâîñòåïåííîå âëèÿíèå íà ðàçìåð îáðàçóþùèõñÿ ïðè äðîáëåíèè êóñêîâ, è ïîýòîìó çàâèñèìîñòü ñðåäíåãî ïî ðàçìåðó êóñêà îò ýíåðãèè, çàòðà÷åííîé íà äðîáëåíèå, ñëåäóåò èñêàòü â èçìåíåíèè äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðû íàïðÿæåííîãî ñîñòîÿíèÿ äåôîðìèðóåìîãî òåëà. Ýòè èçìåíåíèÿ îáóñëîâëåíû ñêîðîñòüþ äåôîðìàöèè, èëè, äðóãèìè ñëîâàìè, êîëè÷åñòâîì ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè, ïîãëîùàåìîé òåëîì â åäèíèöó âðåìåíè. Êàê óæå áûëî ñêàçàíî â ïðåäûäóùåì ïàðàãðàôå, íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ ïåðâîíà÷àëüíî ðàñòóò ñ äåôîðìàöèåé, à ïîòîì îñòàíàâëèâàþòñÿ íà âåëè÷èíå, êîòîðàÿ ïðîïîðöèîíàëüíà ðàçìåðó íåîäíîðîäíîñòè

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\varepsilon}\frac{l}{v}$$

Íà âñåõ íåîäíîðîäíîñòÿõ, ãäå $\Delta\sigma_l$ ïðåâûñèò ïðî÷íîñòíîé ïðåäåë σ*, âîçíèêíóò çàðîäûøè òðåùèí, äàëüíåéøåå ðàçâèòèå êîòîðûõ áóäåò îïðåäåëÿòüñÿ çàïàñîì óïðóãîé ýíåðãèè â îáúåìå ðàçðóøàåìîãî òåëà. Îáîçíà÷èì ðàçìåð íàèìåíüøåé èç òàêèõ íåîäíîðîäíîñòåé l_0:

$$\sigma^* = \rho c_t^2 \dot{\varepsilon}\frac{l_0}{v}.$$

Ðàññòîÿíèå ìåæäó çàðîäûøàìè òðåùèí â òâåðäîì òåëå (L_0) áóäåò îïðåäåëÿòü ìèíèìàëüíûé ðàçìåð êóñêà, à, ñëåäîâàòåëüíî, è ñðåäíèé ðàçìåð, òàê êàê ðàñïðåäåëåíèå ïî êðóïíîñòè ïîëàãàåì èçâåñòíûì. Íàïîìíèì, ÷òî L_0 è l_0 ñâÿçàíû ìåæäó ñîáîé ôîðìóëîé:

$$\frac{L_0^3}{l_0^3} = \frac{\pi Q}{2}$$, ãäå Q - äîáðîòíîñòü.

Êàê ïîêàçàëè ýêñïåðèìåíòàëüíûå èññëåäîâàíèÿ ãðàíóëîìåòðè÷åñêîãî ñîñòàâà, ïðè îäíîêðàòíîì äðîáëåíèè òâåðäîãî òåëà, ðàñïðåäåëåíèå ÷àñòèö ïî êðóïíîñòè ìîæåò áûòü ïðåäñòàâëåíî â âèäå, èìåþùåì ïðîñòîå è íàãëÿäíîå òîëêîâàíèå:

$$L_i^3 N_i = L_0^3 N_0;\ L_i = iL_0.$$

Âñå ôðàêöèè ÷àñòèö, ðàçìåðû êîòîðûõ êðàòíû L_0, çàíèìàþò îäèíàêîâûé îáúåì. Èìååò ìåñòî íå÷òî ïîõîæåå íà çàêîí ðàâíîðàñïðåäåëåíèÿ ýíåðãèè ïî ñòåïåíÿì ñâîáîäû: ýíåðãèÿ ðàçðóøåíèÿ ðàâíîìåðíî ðàñïðåäåëÿåòñÿ ìåæäó ôðàêöèÿìè.

Ñàìî ðàñïðåäåëåíèå ïî êðóïíîñòè êà÷åñòâåííî îòëè÷àåòñÿ îò ðàñïðåäåëåíèÿ íåîäíîðîäíîñòåé â íåðàçðóøåííîì òâåðäîì òåëå, òàê êàê ïîÿâèëàñü õàðàêòåðèñòè÷åñêàÿ äëèíà L_0, êîòîðàÿ ÿâëÿåòñÿ ìàñøòàáîì äëÿ èçìåðåíèÿ êóñêîâ.

×èñëî ôðàêöèé îïðåäåëÿåòñÿ âåðîÿòíîñòüþ îáðàçîâàíèÿ êóñêà íàèìåíüøåãî ðàçìåðà (L_0). Ðàñïîëîæåíèå òðåùèí íà ñîáñòâåííûõ íåîäíîðîäíîñòÿõ (l_0) îáû÷íî ðåäêî ñëó÷àåòñÿ òàêèì, ÷òîáû îíè ïðè ïåðåñå÷åíèè âûäåëèëè áû îòäåëüíîñòü (L_0^3). Îöåíêè ïîêàçàëè, ÷òî ýòà âåðîÿòíîñòü ïîðÿäêà 0,01. Â äàëüíåéøåì äëÿ îïðåäåëåííîñòè áóäåò èñïîëüçîâàòüñÿ âåðîÿòíîñòü, ðàâíàÿ $1/3^4$. Òàêèì îáðàçîì, âñÿ ðàçäðîáëåííàÿ ìàññà óêëàäûâàåòñÿ ðàâíîìåðíî â (3^4) = 81 ôðàêöèîííûé èíòåðâàë øèðèíîé L_0. Ìàêñèìàëüíûé ðàçìåð êóñêà $L_{max} = 81L_0$ è, ñîîòâåòñòâåííî, ñðåäíèé ðàçìåð ãðàíóëîìåòðè÷åñêîãî ñîñòàâà

$$\frac{L_{\max}+L_0}{2} \approx 40L_0.$$

×ðåçâû÷àéíî øèðîêèé ñïåêòð îáðàçóþùèõñÿ ïðè äðîáëåíèè ÷àñòèö òðåáóåò äëÿ ïîëó÷åíèÿ äîñòîâåðíûõ ïàðàìåòðîâ ðàñïðåäåëåíèÿ áîëüøèõ îáúåìîâ èññëåäóåìûõ òâåðäûõ òåë. Òàê, ïîëíûé ñïåêòð ÷àñòèö, âêëþ÷àÿ õîòÿ áû îäèí êóñîê ìàêñèìàëüíîãî ðàçìåðà, èìååò ñóììàðíûé îáúåì $V_0=81L^3_{max} = 0{,}4\bullet10^8L_0^3$. Ïîýòîìó èñõîäíûé ðàçìåð èññëåäóåìîãî òåëà äîëæåí ïðåâîñõîäèòü ìèíèìàëüíûé ðàçìåð êóñêà ïî÷òè â òûñÿ÷ó ðàç:

$$\sqrt[3]{V_0} \ge 350\ L_0.$$

Ñ ýòèì ñâÿçàíû îãðàíè÷åííûå âîçìîæíîñòè òèïîâûõ èñïûòàíèé äëÿ èññëåäîâàíèÿ çàâèñèìîñòè ãðàíóëîìåòðè÷åñêîãî ñîñòàâà îò ìàñøòàáà è ñêîðîñòè äåôîðìèðîâàíèÿ. Ýêñïåðèìåíòàëüíûå äàííûå î ãðàíñîñòàâå â ïðîèçâîëüíî îãðàíè÷åííîì äèàïàçîíå (íàïðèìåð, ðàçìåðàìè îáðàçöà) íå òîëüêî èñêàæàþò ìàñøòàá (L_0), íî è õàðàêòåð ðàñïðåäåëåíèÿ êóñêîâ ïî êðóïíîñòè.

Âî âñåõ ñëó÷àÿõ, êîãäà òðåáóåòñÿ ñîïîñòàâèòü ýôôåêòû ðàçðóøåíèÿ òâåðäîãî òåëà, íàðóøåíèé ñïëîøíîñòè è ñâÿçàííûõ ñ íèìè ïîêàçàòåëåé íà ðàçíûõ ìàñøòàáíûõ óðîâíÿõ, íåîáõîäèìî ïîìíèòü, ÷òî ìåõàíè÷åñêîå ïîâåäåíèå âêëþ÷àåò íå òîëüêî ãåîìåòðèþ òåëà, íî è åãî äèíàìè÷åñêèå ñòðóêòóðû.

Õàðàêòåðíàÿ ñòðóêòóðà áëî÷íîãî ñòðîåíèÿ ïðèðîäíûõ òåë ïðèäàåò èì íîâûå êà÷åñòâà: íå òîëüêî îáëåã÷àåò äåôîðìèðîâàíèå ïîä äåéñòâèåì îáúåìíûõ ñèë, íî è ôèêñèðóåò íàïðàâëåíèå ïðåèìóùåñòâåííûõ ïîäâèæåê. Ýòà ìåõàíè÷åñêàÿ ïàìÿòü ìîæåò âûïîëíÿòü ðîëü èíåðöèè ïðè ìåäëåííîì äâèæåíèè.

Ïîâñåìåñòíîå ðàñïðîñòðàíåíèå áëî÷íîãî ñòðîåíèÿ ãîðíûõ ìàññèâîâ è áîëüøîå ÷èñëî "æèâûõ" ðàçëîìîâ çåìíîé êîðû ñâèäåòåëüñòâóþò î òîì, ÷òî äèíàìè÷åñêèå ñòðóêòóðû ÿâëÿþòñÿ ôîðìîé ñàìîîðãàíèçàöèè äâèæåíèÿ â òâåðäîòåëüíûõ îáîëî÷êàõ Çåìëè.

Ïîäâèæíîñòü òâåðäûõ òåë áëî÷íîãî ñòðîåíèÿ îáóñëîâëåíà òåì, ÷òî äåôîðìàöèÿ ñêëàäûâàåòñÿ èç ïåðåìåùåíèÿ áëîêîâ äðóã îòíîñèòåëüíî äðóãà è äåôîðìàöèè ñàìèõ áëîêîâ. Â òåëàõ áëîêîâ ñòðîåíèÿ ïðè äåôîðìèðîâàíèè âîçíèêàþò öåïî÷êè áëîêîâ, íåñóùèõ íàãðóçêó, ñîçäàþùèõ âíóòðè òåëà êàðêàñ, êîòîðûé ñîïðîòèâëÿåòñÿ èçìåíåíèþ ôîðìû òåëà. Äðóãàÿ ÷àñòü áëîêîâ îñòàåòñÿ ñëàáîíàãðóæåííîé èëè âîâñå ñâîáîäíîé îò íàãðóçêè. Ïåðåñòðîéêà êàðêàñíîé ñòðóêòóðû ñîïðîâîæäàåòñÿ äèíàìè÷åñêèìè ïðîöåññàìè, âîçáóæäàþùèìè óïðóãèå êîëåáàíèÿ âî âñåì òåëå.

Ñâîáîäíûå áëîêè, îáëàäàÿ ïîäâèæíîñòüþ, ìîãóò ïåðåìåùàòüñÿ âíóòðè áëî÷íîé ñòðóêòóðû ïîä âîçäåéñòâèåì áåãóùèõ ïî òåëó óïðóãèõ âîëí. Ýòè ïåðåìåùåíèÿ, áóäó÷è íå ñâÿçàííûìè ñ äåôîðìàöèåé âñåãî òåëà, ïîäãîòàâëèâàþò ïåðåñòðîéêó êàðêàñíîé ñòðóêòóðû - ïåðåðàñïðåäåëåíèå íàãðóçêè ìåæäó áëîêàìè. Â íåêîòîðîì ñìûñëå èõ ðîëü â äåôîðìàöèîííîì ïðîöåññå ïîäîáíà ðîëè äèñëîêàöèé ïðè äåôîðìèðîâàíèè êðèñòàëëè÷åñêîé ðåøåòêè.

3. Ìåäëåííîå äâèæåíèå â òâåðäûõ òåëàõ.

Ìíîãèå ìàòåðèàëû îáëàäàþò ïëàñòè÷íîñòüþ, ëåãêî äåôîðìèðóþòñÿ áåç íàðóøåíèÿ ñïëîøíîñòè. Îáû÷íî ïëàñòè÷åñêîå òå÷åíèå èìååò ìåñòî, êîãäà ìàòåðèàë ñæàò âíåøíèì äàâëåíèåì, ïðåïÿòñòâóþùèì îáðàçîâàíèþ òðåùèí. Êàê ïðàâèëî, ïëàñòè÷íîñòü ìàòåðèàëà èíòåðåñóåò ìåõàíèêà, åñëè íàïðÿæåíèÿ â òâåðäîì òåëå ïðåâûøàþò ïðåäåë óïðóãîñòè. Íî èçâåñòíî, ÷òî ïëàñòè÷åñêîå òå÷åíèå ìîæåò íàáëþäàòüñÿ è ïðè íèçêèõ íàïðÿæåíèÿõ â òâåðäîì òåëå â ñëó÷àå î÷åíü äëèòåëüíûõ íàãðóçîê.

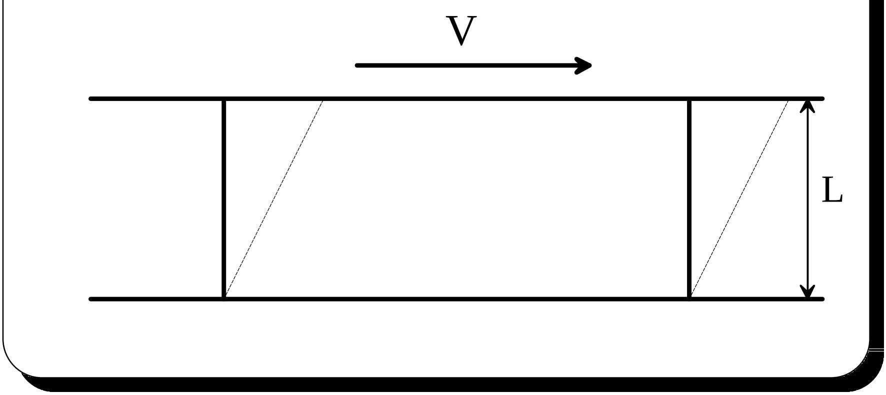
Òàêîå ïîâåäåíèå òâåðäûõ òåë - ïðîÿâëåíèå åãî äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðû. Ïðè äåôîðìàöèè òâåðäîãî òåëà ñ ïîñòîÿííîé ñêîðîñòüþ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ íåáîëüøîãî ðàçìåðà óñòàíàâëèâàåòñÿ ïîñòîÿííîå èçáûòî÷íîå íàïðÿæåíèå, ïðîïîðöèîíàëüíîå ñêîðîñòè äåôîðìàöèè è ëèíåéíîìó ðàçìåðó íåîäíîðîäíîñòè.

Åñëè òåëî èìååò êîíå÷íûå ðàçìåðû, òî ñî âðåìåíåì íà âñåõ íåîäíîðîäíîñòÿõ ïðåêðàòèòñÿ ðîñò íàïðÿæåíèé, âñëåäñòâèå èõ ðåëàêñàöèè. Â áîëüøîì, íî îãðàíè÷åííîì òåëå ðàçìåðû íåîäíîðîäíîñòè òàê æå îãðàíè÷åíû, è ïîýòîìó, ñíèæàÿ ñêîðîñòü äåôîðìàöèè, âåëè÷èíó èçáûòî÷íûõ íàïðÿæåíèé ìîæíî ñäåëàòü ñêîëü óãîäíî ìàëîé. Ñ òî÷êè çðåíèÿ áàëàíñà ñèë âíóòðåííèõ è âíåøíèõ íàïðÿæåííûìè íåîäíîðîäíîñòÿìè ïðè ìåäëåííîì äåôîðìèðîâàíèè, êàçàëîñü áû, ìîæíî ïðåíåáðå÷ü, íî ïîñìîòðèì íà ñëîæèâøóþñÿ ñèòóàöèþ ñ äðóãèõ ïîçèöèé. Â áîëüøîì òåëå ñóììàðíûé îáúåì íåîäíîðîäíîñòåé âñåõ ðàçìåðîâ ìîæåò ïðåâçîéòè ñîáñòâåííûé îáúåì òåëà. Ðàçóìååòñÿ, ïðîñòîå ñëîæåíèå îáúåìîâ íåîäíîðîäíîñòåé ðàçíîãî ðàçìåðà äàåò ëèøü îöåíêó. Îòñóòñòâèå èçáûòî÷íûõ íàïðÿæåíèé ÿâëÿåòñÿ ñëåäñòâèåì ïðîöåññà ðåëàêñàöèè â îáúåìå íåîäíîðîäíîñòè. Ýòè íåîäíîðîäíîñòè ïðåäñòàâëÿþò ñîáîé êàê áû "æèäêèå" âêëþ÷åíèÿ â òâåðäîì òåëå. Ïîêà èõ ìàëî, òâåðäîå òåëî ñîõðàíÿåò ñâîè èñõîäíûå ñâîéñòâà, íî ïî äîñòèæåíèè îïðåäåëåííîé êîíöåíòðàöèè ýòèõ âêëþ÷åíèé îíè ìîãóò îáúåäèíÿòüñÿ è ðàçúåäèíÿòü òâåðäûå áëîêè "æèäêèìè" ïðîñëîéêàìè. Åñòåñòâåííî, ìåõàíè÷åñêèå ñâîéñòâà òåëà êà÷åñòâåííî èçìåíÿòñÿ. Íå÷òî ïîõîæåå ìîæíî íàáëþäàòü, êîãäà æèäêîñòü, íàñûùåííàÿ ãàçîì, âñêèïàåò ïðè áûñòðîì ñíèæåíèè äàâëåíèÿ: æèäêîñòü ñ ïóçûðüêàìè ãàçà ïðåâðàùàåòñÿ â ãàç ñ êàïåëüêàìè æèäêîñòè - ýòî ñîâåðøåííî ðàçíûå ñòðóêòóðû.

Èòàê, ïðè ìåäëåííîì äåôîðìèðîâàíèè áîëüøîãî òåëà ñ íèçêîé äîáðîòíîñòüþ ïî ìåðå íàñûùåíèÿ åãî íåîäíîðîäíîñòÿìè ñ ïîñòîÿííûìè íàïðÿæåíèåì ïðîèñõîäèò òðàíñôîðìàöèÿ äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðû: ïðîòèâîäåéñòâèå èçìåíåíèþ ôîðìû òåëà òåïåðü îáåñïå÷èâàåòñÿ íàïðÿæåíèÿìè íà íåîäíîðîäíîñòÿõ, à óïðóãèìè íàïðÿæåíèÿìè ìîæíî ïðåíåáðå÷ü. Òàê èñòîëêîâûâàåòñÿ ïîëçó÷åñòü (êðèï) â ðàìêàõ ìîäåëè òâåðäîãî òåëà ñî ñòðóêòóðîé. Â íåîãðàíè÷åííîé òâåðäîé ñðåäå ïðè ëþáîé ñêîðîñòè äåôîðìàöèè âñåãäà íàéäåòñÿ äîñòàòî÷íî áîëüøàÿ íåîäíîðîäíîñòü, íà êîòîðîé íàïðÿæåíèÿ áóäóò íàðàñòàòü âïëîòü äî ðàçðóøàþùèõ, òàê ÷òî íåîáðàòèìûå äåôîðìàöèè áåç íàðóøåíèÿ ñïëîøíîñòè â íåîãðàíè÷åííîé ñðåäå íåâîçìîæíû.

Äî ñèõ ïîð â ðàññóæäåíèÿõ î äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðå ïðè ìåäëåííîì äåôîðìèðîâàíèè òâåðäûõ òåë êîëè÷åñòâåííûå êðèòåðèè âîçíèêíîâåíèÿ (èëè ñóùåñòâîâàíèÿ) ðåæèìà êðèïà (ïîëçó÷åñòè) îòñóòñòâîâàëè.

Ðèñ.4.



Ðàññìîòðèì ïðîñòåéøèé ñëó÷àé èñêàæåíèÿ ôîðìû òåëà ïðè ñäâèãå, êàê ýòî ïîêàçàíî íà ðèñ.4. Äâà áåðåãà ïîëîñû ñìåùàþòñÿ äðóã îòíîñèòåëüíî äðóãà ñî ñêîðîñòüþ V. Ñêîðîñòü äåôîðìàöèè âíóòðè ïîëîñû øèðèíîé L ðàâíà $\dot{\varepsilon} = V/L$. Íàïðÿæåíèå íà íåîäíîðîäíîñòÿõ

$$\Delta\sigma_l = \rho c_t^2 \dot{\varepsilon} \frac{l}{v} = \rho c^2 \frac{V}{v}\frac{l}{L}; \quad v = 2\cdot 10^{-6}\text{ ñì/ñ.}$$

Ðåæèì êðèïà âîçìîæåí, åñëè $\Delta\sigma_l << \sigma^*$. Ó÷èòûâàÿ, ÷òî ïðî÷íîñòíûå õàðàêòåðèñòèêè ãîðíûõ ïîðîä íå ïðåâûøàþò îáû÷íî $10^{-3}\rho c_t^2$, ïîëó÷èì:

$$\frac{\Delta\sigma_l}{\rho c_t} = \frac{V}{v}\frac{l}{L} << 10^{-3}, \text{ èëè } V << 10^{-3} v \frac{L}{l}.$$

Åñëè ïðèíÿòü ðàññòîÿíèÿ ìåæäó íåîäíîðîäíîñòÿìè íàèáîëåå êðóïíûìè ïîðÿäêà øèðèíû ïîëîñû L, òî îòíîøåíèå: $\frac{L}{l} = (\frac{\pi\cdot Q}{2})^{1/3}$ ÿâëÿåòñÿ ïîñòîÿííîé âåëè÷èíîé. Îòñþäà ñëåäóåò:

$$V < 10^{-3} v (\frac{\pi\cdot Q}{2})^{1/3}.$$

Òàêèì îáðàçîì, ðåæèì êðèïà (ïîëçó÷åñòè) âîçìîæåí, åñëè ñêîðîñòü ñìåùåíèÿ ïî áåðåãàì ïîëîñû íå ïðåâûøàåò íåêîòîðîé êðèòè÷åñêîé âåëè÷èíû V^*, êîòîðàÿ çàâèñèò îò äîáðîòíîñòè ìàòåðèàëà. Ïðè Q=100 V^*=0,3ñì.ãîä. Òåïåðü æå îáðàòèì âíèìàíèå íà òî, ÷òî êðèòåðèé, íàìè ââåäåííûé, íå ñîäåðæèò ðàçìåðà äåôîðìèðóåìîãî òåëà. Ïîýòîìó ìåõàíèêà òåë, äåôîðìèðóåìûõ â ðåæèìå êðèïà, ÿâëÿåòñÿ ìåõàíèêîé ìåäëåííûõ äâèæåíèé, à íå ìåäëåííûõ äåôîðìàöèé. Äâà ïîäîáíûõ òåëà, èñïûòûâàþùèõ ïîäîáíóþ äåôîðìàöèþ, íî ðàçíîãî ðàçìåðà, áóäóò èìåòü ïîäîáíóþ äèíàìè÷åñêóþ ñòðóêòóðó, åñëè ñêîðîñòè ñìåùåíèÿ èõ ãðàíèö áóäóò îäèíàêîâû. Ïðè ýòîì ñêîðîñòè äåôîðìàöèé â ìåíüøåì òåëå áóäóò áîëüøå â îòíîøåíèè ðàçìåðîâ òåë, à íåîäíîðîäíîñòè ñ îäèíàêîâûìè íàïðÿæåíèÿìè áóäóò èìåòü ðàçìåðû, ïðîïîðöèîíàëüíûå ðàçìåðó òåë.

Ïðè òàêîì ïîäîáèè ñòðóêòóð è íåóïðóãèå íàïðÿæåíèÿ â äåôîðìèðóåìîé ïîëîñå áóäóò îäèíàêîâû. Ýòî, â ñâîþ î÷åðåäü, îçíà÷àåò, ÷òî ýíåðãîçàòðàòû íà ïåðåìåùåíèå òåë, ðàçäåëåííûõ òàêîé ïîëîñîé, íå çàâèñÿò îò øèðèíû ïîëîñû (L).

Òàêîå áåçðàçëè÷èå ê øèðèíå ïîãðàíè÷íûõ çîí ïðè ìåäëåííîì äâèæåíèè òâåðäûõ òåë êà÷åñòâåííî îòëè÷àåò ýòî òå÷åíèå îò òå÷åíèÿ âÿçêîé æèäêîñòè, ãäå íàïðÿæåíèÿ ñäâèãà çàâèñÿò îò ãðàäèåíòà ñêîðîñòè (V/L). Íàïîìíèì, ÷òî â æèäêîñòè è ãàçå âÿçêèå ñèëû ñâÿçàíû ñ ïåðåíîñîì êîëè÷åñòâà äâèæåíèÿ èç îäíîãî ñëîÿ â äðóãîé. Â òâåðäîì òåëå íåóïðóãèå íàïðÿæåíèÿ îáóñëîâëåíû ðåëàêñàöèåé íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ. Ïîõîæåñòü êðèïà è âÿçêîãî òå÷åíèÿ æèäêîñòè âîçíèêàåò íà ïðèíöèïèàëüíî ðàçíûõ ìåõàíèçìàõ äèññèïàöèè ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè.

Âå÷íîå äâèæåíèå, êîòîðûì îõâà÷åíû âñå ìàòåðèàëüíûå òåëà îò ãàëàêòèê äî àòîìà,ïîääåðæèâàåòñÿ ïîòîêîì ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè îò êðóïíûõ òåë, îáëàäàþùèõ îãðîìíûì ãðàâèòàöèîííûì ïîòåíöèàëîì ê ìåíåå êðóïíûì, äàëåå ê ìàëûì è âñå áîëåå ìåëêèì.Â ýòîì ñîñòîèò íàçíà÷åíèå äèíàìè÷åñêèõ ñòðóêòóð â ãåîñôåðàõ, âêëþ÷àÿ òåêòîíè÷åñêèå îáîëî÷êè.

Ãëàâà III. Ïðîáëåìû è ðåøåíèÿ

1. Ïàðàäîêñû ðàçðóøåíèÿ òâåðäîãî òåëà.

Ðàññìîòðèì ñòðóêòóðû íàïðÿæåíèé â òâåðäîì òåëå, êîòîðûå âîçíèêàþò ïðè íàãðóæåíèè è ðàçãðóçêå öèëèíäðè÷åñêîé êîëîííû.

Âûïèøåì óðàâíåíèå äëÿ èçáûòî÷íûõ íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ â òåíçîðíîì ïðåäñòàâëåíèè:

$$\frac{d\Delta\sigma_{ik}^{l}}{dt} = \rho c_t^2\left(\dot{u}_{ik} - \tfrac{1}{3}\dot{u}_{ll}\delta_{ik}\right) - \nu\frac{\Delta\sigma_{ik}^{l}}{l}$$

i, k - îáîçíà÷åíèå îñåé (x, y, z); $\left(u_{ik} - \frac{1}{3}u_{ll}\delta_{ik}\right)$ - äåôîðìàöèÿ ñäâèãà;

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1 \ npu \ i=k \\ 0 \ npu \ i\neq k \end{cases}$$

$\dot{u}_{ik}$ - ñêîðîñòü äåôîðìàöèè. Èçáûòî÷íîå íàïðÿæåíèå, ïðèâîäÿùåå ê èçìåíåíèþ îáúåìà, íà íåîäíîðîäíîñòÿõ îòñóòñòâóåò:

$$\Delta\sigma_{ll} = \Delta\sigma_{xx} + \Delta\sigma_{yy} + \Delta\sigma_{zz} = 0$$

Äîëÿ îáúåìà òåëà, çàíèìàåìàÿ íåîäíîðîäíîñòÿìè îäíîãî ðàçìåðà (l), îïðåäåëÿåòñÿ äîáðîòíîñòüþ ìàòåðèàëà:

$\frac{l^3 dn}{d\ln l} = \frac{2}{\pi Q}$, n - ÷èñëî íåîäíîðîäíîñòåé â åäèíèöå îáúåìà.

Ñðåäíåå íåóïðóãîå íàïðÿæåíèå â òâåðäîì òåëå îïðåäåëÿþòñÿ ñóììèðîâàíèåì íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ ñ ó÷åòîì äîëè ïëîùàäè, êîòîðóþ îíè çàíèìàþò:

$$\sigma_{ik}^{\prime} = \frac{2}{\pi Q}\int_{l} \sigma_{ik}^{l}\, d\ln l$$

Ïóñòü íàãðóæåíèå êîëîííû âî âðåìåíè çàäàíî:

$$P(t) = \begin{cases} P\frac{t}{T}, \ 0<t<T \\ P \qquad t>T \end{cases}$$

Äåôîðìàöèÿ êîëîííû (îñü Z - âåðòèêàëüíà) íåîäíîçíà÷íî ñâÿçàíà ñ âåëè÷èíîé íàãðóçêè (P):

$$u_{zz} = \frac{P}{\pi a^2 E} - \frac{\sigma_{zz}^{\prime}}{E}$$

Çäåñü E - ìîäóëü Þíãà, πa^2 - ïëîùàäü ñå÷åíèÿ êîëîííû; ñæèìàþùèå ñèëû (P, σ_{zz}) êàê è äåôîðìàöèÿ ñæàòèÿ - îòðèöàòåëüíûå âåëè÷èíû.

Íåóïðóãîå íàïðÿæåíèå $\sigma_{zz}^{\prime}$ çàâèñÿò îò ñêîðîñòè äåôîðìàöèè, êîòîðóþ íóæíî íàéòè èç ðåøåíèÿ çàäà÷è. Ó÷èòûâàÿ, ÷òî íåóïðóãîå íàïðÿæåíèå ìíîãî ìåíüøå óïðóãèõ, ìîæíî âîñïîëüçîâàòüñÿ ìåòîäîì ïîñëåäîâàòåëüíîãî ïðèáëèæåíèÿ:

$$u_{zz} \approx \frac{P(t)}{\pi a^2 E} = \frac{p}{\pi a^2 E}\frac{t}{T}$$

$$\dot{u}_{zz} \approx \frac{P}{\pi a^2 E} \cdot \frac{1}{T} \text{ â èíòåðâàëå } 0 \le t \le T$$

Óïðóãèå äåôîðìàöèè: $u_{xx} = u_{yy} = -\sigma u_{zz}$; σ - êîýôôèöèåíò Ïóàññîíà.

Îáúåìíàÿ äåôîðìàöèÿ: $u_{ll} = u_{xx} + u_{yy} + u_{zz} = (1 - 2\sigma)u_{zz}$

Ñäâèãîâàÿ äåôîðìàöèÿ: $(u_{zz} - \frac{1}{3}u_{ll}) = \frac{2}{3}(1 + \sigma)u_{zz}$

Ïîäñòàâèì â óðàâíåíèå äëÿ íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ ñêîðîñòü ñäâèãîâîé äåôîðìàöèè $\frac{2}{3}(1+\sigma)\dot{u}_{zz}$, à òàêæå çàìåíèì $\rho c_t^2 = \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}$. Â ðåçóëüòàòå ïîëó÷èì:

$$\frac{d\Delta\sigma_{zz}^l}{dt} = \frac{E}{3}\dot{u}_{zz} - v\frac{\Delta\sigma_{zz}^l}{l}$$

Èíòåãðèðóÿ ïî âðåìåíè â èíòåðâàëå $0<t<T$, êîãäà $\dot{u}_{zz} = \frac{P}{\pi a^2 E}\frac{1}{T}$, íàéäåì:

$$\Delta\sigma_{zz}^l = \frac{P}{3\pi a^2}\frac{l}{v \cdot T}[1 - e^{-vt/l}]$$

Äðóãèå êîìïîíåíòû òåíçîðà:

$$\Delta\sigma_{xx} = \Delta\sigma_{yy} = -\tfrac{1}{2}\Delta\sigma_{zz}$$

Îòìåòèì, ÷òî íàïðÿæåíèÿ, íàïðàâëåííûå ïî íîðìàëè ê áîêîâîé ïîâåðõíîñòè êîëîííû èìåþò äðóãîé çíàê: åñëè σ_{zz}- ñæèìàþùåå íàïðÿæåíèå, òî $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ - ðàñòÿãèâàþùåå.

Óïðîùåííî çàâèñèìîñòü $\Delta\sigma_{zz}^l(T, l)$ â ìîìåíò âðåìåíè $t=T$ ìîæíî ïðåäñòàâèòü òàê:

$$\Delta\sigma_{zz}^l \approx \frac{1}{3}\frac{P}{\pi a^2}\frac{l}{v \cdot T} \text{ äëÿ } \frac{l}{v \cdot T} < 1$$

$$\Delta\sigma_{zz}^l \approx \frac{1}{3}\frac{P}{\pi a^2} \text{ äëÿ } \frac{l}{v \cdot T} > 1.$$

Íà êðóïíûõ íåîäíîðîäíîñòÿõ èçáûòî÷íûå íàïðÿæåíèÿ îäèíàêîâû è äîñòèãàþò 1/3 óïðóãèõ íàïðÿæåíèé â êîëîííå. Íà ìåëêèõ íåîäíîðîäíîñòÿõ íàïðÿæåíèÿ ïðîïîðöèîíàëüíû l, òàê ÷òî ïðè èíòåãðèðîâàíèè èõ âêëàäîì â âåëè÷èíó íåóïðóãèõ íàïðÿæåíèé ïðåíåáðåæåì:

$$\sigma_{zz}' = \frac{2}{\pi \cdot Q}\int_{l=vt}^{a} \Delta\sigma_{zz}^l d\ln l = \frac{P}{\pi a^2}\frac{2}{3\pi Q}\ln\frac{a}{v \cdot T}$$

Ïîäñòàâèì âåëè÷èíû, êîòîðûå ìîãóò âñòðåòèòüñÿ â ïðàêòèêå: $a = 100$ñì, $T = 10^5$ñåê, $Q = 10^2$:

$$\sigma'_{zz} = \frac{P}{\pi a^2}\frac{2}{3\pi \cdot 10^2}\ln\frac{100}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5} \approx 10^{-2}\frac{P}{\pi a^2}$$

Âèäíî, ÷òî íåóïðóãèå íàïðÿæåíèÿ äåéñòâèòåëüíî î÷åíü ìàëû è ïîýòîìó ñòàòèêà, êàçàëîñü áû, îïðàâäàíà âî âñåõ ñëó÷àÿõ, åñëè òîëüêî ìîæíî ïðåíåáðå÷ü ñèëàìè èíåðöèè. Îäíàêî, òàêîå ñóæäåíèå â äàííîì ñëó÷àå ñëèøêîì ïîñïåøíî. Äåëî â òîì, ÷òî íåóïðóãèå íàïðÿæåíèÿ è ïîñëå íàãðóæåíèÿ êîëîííû ïðîäîëæàþò ìåíÿòüñÿ âî âðåìåíè, à çíà÷èò, áóäåò ìåíÿòüñÿ è äåôîðìàöèÿ êîëîííû. Îãðàíè÷èâàòüñÿ ñîïîñòàâëåíèåì âåëè÷èí óïðóãèõ è íåóïðóãèõ íàïðÿæåíèé, èãíîðèðóÿ âðåìåííûå ïàðàìåòðû, áûëî áû íåïðàâèëüíûì.

Ïðè ïîñòîÿííîé íàãðóçêå (P) ñêîðîñòü äåôîðìàöèè ïðàêòè÷åñêè ðàâíà íóëþ, òàê ÷òî

$$\frac{d\Delta\sigma^{l}_{zz}}{dt} = -\nu\frac{\Delta\sigma^{l}_{zz}}{l}$$

Èíòåãðèðóÿ ïî âðåìåíè, âåäÿ îòñ÷åò åãî îò ìîìåíòà, êîãäà èçáûòî÷íûå íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ äîñòèãëè $\Delta\sigma_{zz} = \frac{1}{3}\frac{P}{\pi a^2}$ è â äàëüíåéøåì áóäóò ðåëàêñèðîâàòü, ïîëó÷èì:

$$\Delta\sigma^{l}_{zz} = \frac{P}{3\pi a^2}e^{-\nu t/l}$$

×òîáû îïðåäåëèòü íåóïðóãèå íàïðÿæåíèÿ, íóæíî ïðîèíòåãðèðîâàòü ïî âñåì íåîäíîðîäíîñòÿì. Âîñïîëüçóåìñÿ óïðîùåííûì ïðåäñòàâëåíèåì ïîäûíòåãðàëüíîé ôóíêöèè.

$$\sigma'_{zz} = \frac{2}{\pi\cdot Q}\cdot\frac{P}{3\pi a^2}\int_{l^*}^{a} e^{-\nu t/l}\,d\ln l;\quad l^* = \nu(T+t)$$

$$e^{-\nu t/l} \approx \begin{cases} 1; npu; \nu t/l<1 \\ 0; npu; \nu t/l>1 \end{cases}$$

$$\sigma'_{zz} \approx \frac{2}{\pi\cdot Q}\cdot\frac{P}{3\pi a^2}\ln\frac{a}{\nu(t+T)}$$

Õîòÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ êàæäîãî ðàçìåðà íàïðÿæåíèÿ ðåëàêñèðóþò ïî ýêñïîíåíòå, íåóïðóãîå íàïðÿæåíèå ñïàäàåò ìåäëåííåé, ïî ëîãàðèôìè÷åñêîìó çàêîíó:

$$\frac{\sigma'_{zz}}{(\sigma'_{zz})_{t=0}} = \frac{\ln(a/\nu t)}{\ln(a/\nu T)} \quad (t >> T)$$

Âðåìÿ, â òå÷åíèå êîòîðîãî íåóïðóãîå íàïðÿæåíèå óìåíüøèòñÿ â äâà ðàçà, êàê ñëåäóåò èç ïîñëåäíåãî ñîîòíîøåíèÿ, áóäåò íà ïîðÿäîê áîëüøå âðåìåíè íàãðóæåíèÿ (T). Òàê, â ïðèâåäåííîì íàìè ïðèìåðå $T = 10^5$ ñåê (îäíè ñóòêè). Çíà÷èò, äåôîðìàöèÿ êîëîííû çà ñ÷åò ðåëàêñàöèè íåóïðóãèõ íàïðÿæåíèé áóäåò ïðîäîëæàòüñÿ íåñêîëüêî äåêàä. Áîëüøàÿ äëèòåëüíîñòü ïðîÿâëåíèÿ äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðû ìîæåò ñóùåñòâåííî èçìåíèòü îöåíêó ðîëè íåóïðóãèõ íàïðÿæåíèé, êîãäà ðå÷ü èäåò î âðåìåííîé ïîñëåäîâàòåëüíîñòè è ñêîðîñòè ñòðîèòåëüñòâà êðóïíîìàñøòàáíîãî ñîîðóæåíèÿ.

Ðàññìîòðèì òåïåðü ñòðóêòóðó íàïðÿæåíèé â êîëîííå ïðè ðàçãðóçêå ïîñëå ðåëàêñàöèè âñåõ íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ. Åñëè ðàçãðóçêà ïðîèçâîäèòñÿ çà âðåìÿ T ïî ëèíåéíîìó çàêîíó, òî íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ âîçíèêàþò ñíîâà, íî óæå ñ äðóãèì çíàêîì:

$$\Delta\sigma^{l}_{zz} \approx -\frac{1}{3}\frac{P}{\pi a^2} \quad \text{(íà íåîäíîðîäíîñòÿõ } l > \nu T)$$

Íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ èìåþò òîò æå çíàê, ÷òî è äåôîðìàöèÿ: ïðè ñæàòèè $u_{zz} < 0$ è $\Delta\sigma_{zz} < 0$; ïðè ðàñòÿæåíèè $u_{zz}>0$ è $\Delta\sigma_{zz} > 0$.

Êîãäà êîëîííà íàãðóæàëàñü, σ'_{zz} ïðåïÿòñòâîâàëè ñæàòèþ êîëîííû. Ïî ìåðå ðåëàêñàöèè íåóïðóãèõ íàïðÿæåíèé íàãðóçêó íà ñåáÿ ïðèíèìàëè óïðóãèå ñèëû, âñëåäñòâèå ÷åãî êîëîííà ïðîäîëæàëà ñæèìàòüñÿ.

Ïðè ðàçãðóçêå íåóïðóãèå íàïðÿæåíèÿ ïðåïÿòñòâóþò ðàñòÿæåíèþ, êîòîðîå ïðîèñõîäèò â ïðîöåññå âîññòàíîâëåíèÿ èñõîäíîé äëèíû êîëîííû óïðóãèìè ñèëàìè. Â òîò ìîìåíò, êîãäà íàãðóçêà áóäåò ïîëíîñòüþ ñíÿòà, óïðóãèå íàïðÿæåíèÿ â êîëîííå èñ÷åçíóò íå ïîëíîñòüþ, ò.ê. îíè äîëæíû áóäóò óðàâíîâåøèâàòü äåéñòâèå ðàñòÿãèâàþùèõ íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ.

Â èäåàëüíîì óïðóãîì òåëå ïðè ìàëîé ñêîðîñòè íàãðóæåíèÿ è ðàçãðóçêè, êîãäà âðåìÿ íàãðóæåíèÿ èëè ðàçãðóçêè, óìíîæåííîå íà ñêîðîñòü óïðóãèõ âîëí, ìíîãî áîëüøå ëèíåéíûõ ðàçìåðîâ òåëà, äåôîðìàöèè ñòðîãî ñëåäóþò çà íàãðóçêîé, ò.ê. íàïðÿæåíèÿ è äåôîðìàöèè ñâÿçàíû ìåæäó ñîáîé çàêîíîì Ãóêà. Â íàøåì ïðèìåðå íàãðóæåíèÿ è ðàçãðóçêè êîëîííû $u_{zz} = \frac{P}{\pi a^2 E}$ è $u_{zz} = \frac{\sigma_{zz}}{E}$.

Åñëè σ_{zz} íå ïðåâîñõîäèò ïðåäåë ïðî÷íîñòè ìàòåðèàëà íà ðàçäàâëèâàíèå, íèêàêèõ íàðóøåíèé ñïëîøíîñòè â òåëå êîëîííû íå äîëæíî áûòü, ò.ê. îòñóòñòâóþò ðàñòÿãèâàþùèå íàïðÿæåíèÿ. Îäíàêî, â öåëèêàõ, óäåðæèâàþùèõ êðîâëþ ïîäçåìíûõ âûðàáîòîê, (àíàëîãè ðàññìîòðåííûõ íàìè êîëîíí) íàáëþäàþòñÿ âåðòèêàëüíûå òðåùèíû, øåëóøåíèå áîêîâûõ ïîâåðõíîñòåé, ÷òî ñâèäåòåëüñòâóåò î íàëè÷èè ðàñòÿãèâàþùèõ íàïðÿæåíèé.

Äëÿ îäíîðîäíîãî óïðóãîãî òåëà òàêàÿ ðåàêöèÿ íà îñåâóþ íàãðóçêó âûãëÿäèò ïàðàäîêñàëüíîé, íåîáúÿñíèìîé. Íåîäíîðîäíîñòè, íà êîòîðûõ ïðè äåôîðìèðîâàíèè âîçíèêàþò èçáûòî÷íûå íàïðÿæåíèÿ, ïîçâîëÿþò ñâÿçàòü ýòî ÿâëåíèå ñ äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðîé òâåðäîãî òåëà.

Åñëè ïðè íàãðóæåíèè êîëîííû íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ $\Delta\sigma_{zz}$ ñæèìàþùèå, òî $\Delta\sigma_{yy} = \Delta\sigma_{xx}$ - ðàñòÿãèâàþùèå:

$$\Delta\sigma_{xx} = -\frac{1}{2}\Delta\sigma_{zz} = -\frac{1}{2}\frac{P}{3\pi a^2} = \frac{1}{6}\sigma_{zz}$$

Õîòÿ ýòè íàïðÿæåíèÿ çàìåòíî ìåíüøå íàïðÿæåíèé, óðàâíîâåøèâàþùèõ îñåâóþ íàãðóçêó, íî îíè äåéñòâóþò â ïëîùàäêàõ, ãäå óïðóãèå íàïðÿæåíèÿ âîîáùå îòñóòñòâóþò, à ïðî÷íîñòü ãîðíûõ ïîðîä íà ðàñòÿæåíèå ÷àñòî íà ïîðÿäîê ìåíüøå ïðî÷íîñòè íà ðàçäàâëèâàíèå. Òàêèì îáðàçîì, äèíàìè÷åñêàÿ ñòðóêòóðà èãðàåò îïðåäåëÿþùóþ ðîëü â ïðîöåññå çàðîæäåíèÿ òðåùèí, ðîñò êîòîðûõ ïðèâîäèò ê ðàçðóøåíèþ òâåðäîãî òåëà.

Åùå áîëåå ïàðàäîêñàëüíûì ïðåäñòàâëÿåòñÿ ðàçðóøåíèå òâåðäîãî òåëà ïðè ðàçãðóçêå, êîãäà óìåíüøàþòñÿ ñæèìàþùèå óïðóãèå íàïðÿæåíèÿ â òåëå. Äèíàìè÷åñêàÿ ñòðóêòóðà íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ è â ýòîì ñëó÷àå îáúÿñíÿåò ïîÿâëåíèå òðåùèí â ïîïåðå÷íîì ñå÷åíèè êîëîííû ïðè åå ðàçãðóçêå: ðàñòÿãèâàþùèå íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ äîñòèãàþò îäíîé òðåòè ñæèìàþùèõ óïðóãèõ íàïðÿæåíèé è, êàê áûëî ïîêàçàíî, íå èñ÷åçàþò òîò÷àñ ñ óìåíüøåíèåì ñæèìàþùèõ òåëî ñèë.

Îáà ïàðàäîêñàëüíûõ ýôôåêòà ìîãóò áûòü âîñïðîèçâåäåíû â îïûòàõ ïî ðàçðóøåíèþ õðóïêèõ òåë è ðåçóëüòàòû ñîãëàñîâàíû ñ îöåíêàìè, âûòåêàþùèìè èç ïðåäñòàâëåíèé ìîäåëè òâåðäîãî òåëà.

2.Ñåéñìè÷åñêèé ðåæèì è ñòðóêòóðà ðàçðóøåíèÿ.

Ñðåäè ìíîãî÷èñëåííûõ ñâèäåòåëüñòâ ïîñòîÿíñòâà äåôîðìàöèîííûõ ïðî-öåññîâ â çåìíûõ íåäðàõ çåìëåòðÿñåíèÿ çàíèìàþò åäâà ëè íå ïåðâîå ìåñòî. Â ÷åëîâå÷åñêîì âîñïðèÿòèè çåìëåòðÿñåíèÿ - ïóãàþùåå ïðîÿâëåíèå ñòèõèè.

Ñèñòåìàòè÷åñêàÿ ðàáîòà ïî ñîçäàíèþ ñåòè ïðèáîðîííîé ðåãèñòðàöèè çåìëå-òðÿñåíèé è íàêîïëåíèþ ìàòåðèàëà íàáëþäåíèé çà ïîñëåäíåå ñòîëåòèå äàëà çàìå÷àòåëüíûå ïëîäû. Áûëà âûÿâëåíà óïîðÿäî÷åííîñòü çåìëåòðÿñåíèé ðàç-ëè÷íîé ýíåðãèè, êîòîðàÿ íàøëà ñâîå âûðàæåíèå â çàêîíå ïîâòîðÿåìîñòè çåì-ëåòðÿñåíèé Ãóòåíáåðãà-Ðèõòåðà. Ñåéñìè÷åñêèå êîëåáàíèÿ ïîâåðõíîñòè Çåìëè, âûçâàííûå óïðóãèìè âîëíàìè, èçëó÷àåìûìè ïðè çåìëåòðÿñåíèÿõ, ÿâëÿþòñÿ ãëàâíûì èñòî÷íèêîì èíôîðìàöèè î âíóòðåííåì ñòðîåíèè Çåìëè. Îäíàêî ñàì î÷àã çåìëåòðÿñåíèÿ îñòàåòñÿ äî ñèõ ïîð î÷åíü òðóäíûì äëÿ èññëåäîâàíèÿ îáúåêòîì. Ýòî ñâÿçàíî ñ òåì, ÷òî óïðóãèå âîëíû ôîðìèðóþòñÿ çà ïðåäåëàìè î÷àãà è ïîýòîìó ìîãóò äàòü ëèøü ñàìûå îáùèå ïðåäñòàâëåíèÿ î õàðàêòåðå äâèæåíèÿ â î÷àãîâîé çîíå.

Ïî ìíåíèþ Þ.Â.Ðèçíè÷åíêî, âûäâèíóâøåãî èäåþ íåïðåðûâíîñòè ïîòîêà ñåéñìè÷åñêîé ýíåðãèè, êëþ÷åâîé çàäà÷åé ñåéñìîðàéîíèðîâàíèÿ ÿâëÿåòñÿ îï-ðåäåëåíèå ìàêñèìàëüíîãî çåìëåòðÿñåíèÿ, êîòîðîå âîçìîæíî â òîì èëè èíîì ðåãèîíå. Çàêîí Ãóòåíáåðãà-Ðèõòåðà óñòàíàâëèâàåò ÷àñòîòó ïîâòîðåíèÿ çåìëå-òðÿñåíèé ðàçëè÷íîé ýíåðãèè. Ýíåðãèÿ çåìëåòðÿñåíèÿ ïðîïîðöèîíàëüíà îáúå-ìó, â ïðåäåëàõ êîòîðîãî íàêîïëåííàÿ ýíåðãèÿ óïðóãèõ íàïðÿæåíèé òâåðäîãî òåëà îñóùåñòâëÿåò áûñòðîå èçìåíåíèå åãî ôîðìû, ñîïðîâîæäàåìîå èçëó÷åíè-åì óïðóãèõ âîëí. Ïåðåõîäÿ îò ýíåðãèè ê îáúåìó î÷àãà (L^3), ïîëó÷àåì î÷åíü ïðîñòîå âûðàæåíèå äëÿ çàêîíà ïîâòîðÿåìîñòè çåìëåòðÿñåíèé:

$$L_i^3 N_i = \text{const},\ \text{ãäå}\quad L_i = iL_0\ (1 < i < 81);$$

N_i - ÷èñëî çåìëåòðÿñåíèé â ãîä.

Ýòîò çàêîí áûë óñòàíîâëåí äëÿ Çåìëè â öåëîì â äèàïàçîíå ýíåðãèé îò 10^{18}ýðã äî 10^{24}ýðã.

Â äàëüíåéøåì ïîäîáíûå çàâèñèìîñòè áûëè óñòàíîâëåíû è äëÿ ðåãèîíîâ. Ïðè ýòîì èíòåðâàëû ýíåðãèé çåìëåòðÿñåíèé íåðåäêî îãðàíè÷èâàëèñü ÷óâñòâè-òåëüíîñòüþ àïïàðàòóðû. Â ðåçóëüòàòå èç ïîëÿ çðåíèÿ âûïàäàë õàðàêòåðèñòè-÷åñêèé ðàçìåð î÷àãà, êîòîðûé ìîæíî áûëî áû ñîïîñòàâèòü ñ åñòåñòâåííûì äèà-ïàçîíîì èçìåíåíèÿ ýíåðãèé çåìëåòðÿñåíèé â ðåãèîíå.

Ïðîñòðàíñòâåííîå ðàñïðåäåëåíèå î÷àãîâ íåîäíîðîäíî, è çîíû ñåéñìè÷åñ-êîé àêòèâíîñòè îãðàíè÷åíû. Â îãðàíè÷åííîì îáúåìå íå ìîãóò ïðîèçîéòè çåì-ëåòðÿñåíèÿ, î÷àã êîòîðîãî áûë áû ñ íèì ñîèçìåðèì. Îäíàêî èç ÷èñòî ãåîìåò-ðè÷åñêèõ ñîîáðàæåíèé ìîæíî ëèøü îáîçíà÷èòü ïðåäåëüíûå çíà÷åíèÿ, êîòî-ðûå íèêîãäà íå áóäóò ðåàëèçîâàíû.

Âîñïîëüçóåìñÿ òåì, ÷òî çàêîí Ãóòåíáåðãà-Ðèõòåðà ôîðìàëüíî ñîâïàäàåò ñ ðàñïðåäåëåíèåì êóñêîâ ïî êðóïíîñòè â ñòðóêòóðå ðàçðóøåíèÿ òâåðäîãî òåëà. Ðàçìåðû ìèíèìàëüíîãî è ìàêñèìàëüíîãî êóñêîâ çàâèñÿò îò ñêîðîñòè äåôîð-ìàöèè òåëà. Ïðåäïîëîæèì, ÷òî çåìëåòðÿñåíèÿ ïðåäñòàâëÿþò ñîáîé àêò îáðà-çîâàíèÿ áëîêà, îòäåëåíèÿ åãî îò îêðóæàþùåãî ìàññèâà. Òîëüêî â ýòîì ñëó÷àå, êàê ïðè îáðûâå ñòðóíû, ìîæåò ïðîèçîéòè áûñòðîå èçìåíåíèå ôîðìû è â îêðó-æàþùåì ïðîñòðàíñòâå âîçíèêíóò óïðóãèå âîëíû. Ïîëîâèíà çàïàñåííîé â î÷àãå óïðóãîé ýíåðãèè èçëó÷èòñÿ âîâíå, à äðóãàÿ ïîëîâèíà áóäåò "ïîòåðÿíà" â çàòóõàþùèõ êîëåáàíèÿõ îòäåëüíîãî áëîêà. Ðàçìåðû î÷àãîâ ìèíèìàëüíîãî è ìàêñèìàëüíîãî çåìëåòðÿñåíèé âçàèìîñâÿçàíû, êàê è êóñêè â ðàçðóøàåìîì òâåðäîì òåëå: $L_{max} = 81L_{min}$.

Ïîëó÷åíèå ïðåäñòàâèòåëüíîãî ðÿäà çåìëåòðÿñåíèé â îòäåëüíîì ðåãèîíå âîçìîæíî, åñëè îáúåì ìàññèâà, äåôîðìèðóåìûé ñ ïîñòîÿííîé ñêîðîñòüþ, ïðèìåðíî íà äâà ïîðÿäêà ïðåâîñõîäèò îáúåì î÷àãà íàèáîëüøåãî èç âîçìîæíûõ çåìëåòðÿñåíèé. Â ïðîòèâíîì ñëó÷àå ðåãèîíàëüíàÿ ïîâòîðÿåìîñòü çåìëåòðÿñåíèé áóäåò èñêàæåíà. Ïðåäîñòàâèì ñïåöèàëèñòàì ðåøàòü ìåòîäè÷åñêèå ïðîáëåìû.

Òåïåðü æå ïðîâåäåì ñîïîñòàâëåíèå ñåéñìè÷åñêèõ ðåæèìîâ ïðè ðàçëè÷íûõ ñêîðîñòÿõ äåôîðìèðîâàíèÿ çåìíîé êîðû. Âûïèøåì ïàðàìåòðû è ñîîòíîøåíèÿ ìåæäó íèìè â ñåéñìîàêòèâíîé çîíå:

V_0 - îáúåì ëèòîñôåðû, â ïðåäåëàõ êîòîðîé ñêîðîñòü äåôîðìàöèè ïîñòîÿííà è óñòàíàâëèâàåòñÿ ñòàöèîíàðíûé ñåéñìè÷åñêèé ðåæèì;

$\dot{\varepsilon}$ - ñêîðîñòü ñäâèãîâîé äåôîðìàöèè;

$\Delta\sigma*$ - ïðåäåëüíîå íàïðÿæåíèå íà íåîäíîðîäíîñòÿõ, ïðè äîñòèæåíèè êîòîðîãî ïîÿâëÿþòñÿ òðåùèíû;

$l_0 = \frac{v}{\dot{\varepsilon}}\frac{\Delta\sigma*}{\mu}, \quad (\mu = \rho c_t^2)$ - ðàçìåð íåîäíîðîäíîñòåé, êîòîðûå ó÷àñòâóþò â ôîðìèðîâàíèè ñòðóêòóðû ðàçðóøåíèÿ;

$L_0 = l_0\left(\frac{\pi\cdot Q}{2}\right)^{1/3}$ - ñðåäíåå ðàññòîÿíèå ìåæäó òðåùèíàìè, îïðåäåëÿþùåå ìèíèìàëüíûé ðàçìåð î÷àãà;

$E_0 = \frac{(\Delta\sigma*)^2 l_0^3}{2\mu}$ - ýíåðãèÿ, âûäåëÿåìàÿ ïðè îòäåëåíèè áëîêà îáúåìîì l_0^3; ïîëîâèíà åå èçëó÷àåòñÿ â âèäå óïðóãèõ âîëí è ïðèíèìàåòñÿ çà ýíåðãèþ çåìëåòðÿñåíèÿ;

$N_0 = \left(\frac{L_{max}}{L_0}\right)^3 = 81^3 \approx 5\cdot10^5$ 1/ãîä, åñëè $N_{max} = 1$ 1/ãîä.

Äëÿ îïðåäåëåííîñòè çàôèêñèðóåì ìåõàíè÷åñêèå õàðàêòåðèñòèêè âåùåñòâà ëèòîñôåðû â ñåéñìîãåííîé çîíå:

$\mu = 5\cdot10^{11}$ äèí/ñì^2; $Q = 100$; $\Delta\sigma*/\mu = 2\cdot10^{-4}$.

Òîëùèíó ñåéñìîãåííîãî ñëîÿ ïðèìåì ðàâíîé $H = 100$êì., åñëè $(V_0)^{1/3} > 100$ êì. Ïîäñòàâèâ ýòè çíà÷åíèÿ â ôîðìóëû, ïîëó÷èì ñëåäóþùèå çàâèñèìîñòè.

Ðàçìåð íåîäíîðîäíîñòè $l_0 = \frac{10^{-4}}{\dot{\varepsilon}}$; åñëè $\dot{\varepsilon}$ èçìåðÿòü â 1/ãîä, òî l_0 ïîëó÷èì â ìåòðàõ. Ðàçìåð î÷àãà ìèíèìàëüíîãî çåìëåòðÿñåíèÿ

$$L_0 = \left(\frac{\pi\cdot Q}{2}\right)^{1/3}\cdot l_0 \approx 5l_0.$$

Êëàññ (K) çåìëåòðÿñåíèÿ ÷èñëåííî ðàâåí äåñÿòè÷íîìó ëîãàðèôìó ýíåðãèè, èçëó÷àåìîé óïðóãèìè âîëíàìè, â äæîóëÿõ.

Êëàññ ìèíèìàëüíîãî çåìëåòðÿñåíèÿ îáîçíà÷èì K_0, òîãäà:

$$K_0 = \lg\left(\frac{5\cdot 10^{-10}}{\dot{\varepsilon}^3}\right); \quad K_i = K_0 + 3\lg\frac{L_i}{L_0}$$

$$K_{\max} \approx K_0 + 6.$$

Âåñü ñïåêòð çåìëåòðÿñåíèé îò K_0 äî K_{max} äëÿ ñâîåé ðåàëèçàöèè íóæäàåòñÿ â îáúåìå

$$V_0 \approx \frac{5\cdot 10^{-12}}{\dot{\varepsilon}^3}; \quad [\varepsilon] = 1/\text{ãîä};\ [V_0] = \text{êì}^3.$$

Ïëîùàäü ñåéñìîãåííîé çîíû:

$$S_0 = \frac{V_0}{100} \ \text{äëÿ}\ V_0 > H^3.$$

Âðåìÿ íàðàñòàíèÿ íàïðÿæåíèé íà íåîäíîðîäíîñòÿõ $\Theta = \frac{2l_0}{v}$ îïðåäåëÿåò âðåìÿ ïîäãîòîâêè çåìëåòðÿñåíèÿ - îíî îäèíàêîâî äëÿ âñåõ êëàññîâ çåìëåòðÿñåíèé â äàííîé ñåéñìîãåííîé çîíå (îäèíàêîâàÿ ñêîðîñòü äåôîðìàöèè)

$$\Theta = \frac{3\cdot 10^{-4}}{\dot{\varepsilon}}.$$

×àñòîòà ïîâòîðåíèÿ çåìëåòðÿñåíèé Ki-êëàññà ðàâíà ÷èñëó áëîêîâ N_i ñîîòâåòñòâóþùåãî ðàçìåðà (L_i), îòíåñåííîìó ê èíòåðâàëó âðåìåíè Θ.

Â òàáëèöå ïðèâåäåíû ïàðàìåòðû ñåéñìè÷åñêîãî ðåæèìà äëÿ òðåõ çíà÷åíèé ñêîðîñòè äåôîðìàöèè $\dot{\varepsilon}$ = 10^{-5}; 10^{-6}; 10^{-7}, êîòîðûå îõâàòûâàþò ïðàêòè÷åñêè âåñü äèàïàçîí ñêîðîñòåé äåôîðìàöèè â ñåéñìîãåííîé çîíå.

Òàáëèöà 1

$\dot{\varepsilon}$	1/ãîä	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
L_0,	ì	50	500	5000
K_0		5,7	8,7	11,7
$L_{\max}$,	êì	4	40	400
$K_{\max}$		11,7	14,7	17,7
V_0,	êì^3	$5\cdot 10^3$	$5\cdot 10^6$	$5\cdot 10^9$
S_0,	êì^2	$3\cdot 10^2$	$5\cdot 10^4$	$5\cdot 10^7$
Θ	ëåò	30	300	3000
N_0,	1/ãîä	$15\cdot 10^3$	$1,5\cdot 10^3$	$0,15\cdot 10^3$
$N_{\max}$,	1/ãîä	$3\cdot 10^{-2}$	$3\cdot 10^{-3}$	$3\cdot 10^{-4}$

Êîðîòêèé êîììåíòàðèé. Ïðè íèçêèõ ñêîðîñòÿõ äåôîðìàöèè ìàêñèìàëüíûé î÷àã çåìëåòðÿñåíèÿ îõâàòûâàåò âñþ òîëùó ëèòîñôåðû. Ïîâòîðÿåìîñòü òàêèõ êàòàñòðîôè÷åñêèõ çåìëåòðÿñåíèé íà óðîâíå îäíîãî ðàçà â 1000ëåò ñ ðàâíîé âåðîÿòíîñòüþ íà òåððèòîðèè 7000×7000êì^2. Åñëè æå îöåíèòü âåðîÿòíîñòü ñîáûòèÿ òàêîãî ðîäà íà ïëîùàäè 10^6êì^2, òî îíà îêàæåòñÿ åùå â 50 ðàç ìåíüøå.

Ïðàêòè÷åñêè ýòî çíà÷èò, ÷òî ñåéñìè÷åñêèé ðåæèì ïðè ñêîðîñòè äåôîðìè-ðîâàíèÿ 10^{-7}1/ãîä íà îãðàíè÷åííîé òåððèòîðèè áóäåò âîñïðèíèìàòüñÿ êàê íå-ðåãóëÿðíûé, à îòäåëüíûå çåìëåòðÿñåíèÿ - êàê íåïðåäñêàçóåìûå è ñëó÷àéíûå ñîáûòèÿ.

Ïðè ñêîðîñòÿõ äåôîðìàöèè $\dot{\varepsilon} > 10^{-5}$ ñåéñìîãåííûå îáëàñòè ìîãóò èìåòü ðàçìåðû ìåíåå 100êì, à âðåìÿ ïîâòîðåíèÿ çåìëåòðÿñåíèé íå áóäåò ïðåâûøàòü 10ëåò. Äëÿ òàêèõ ëîêàëüíûõ ñåéñìîãåííûõ îáëàñòåé, áëàãîäàðÿ âûñîêîé ÷àñ-òîòå ñîáûòèé, ìîãóò áûòü ðàçðàáîòàíû âñåâîçìîæíûå ýìïèðè÷åñêèå ïðîãíîñ-òè÷åñêèå ïðèçíàêè, íî îíè íå ïðåäñòàâëÿþò áîëüøîãî èíòåðåñà, ò.ê. çåìëåòðÿ-ñåíèÿ â ýòèõ îáëàñòÿõ èìåþò íèçêèå ýíåðãåòè÷åñêèå êëàññ è íå î÷åíü îïàñíû.

Íàèáîëåå ðàñïðîñòðàíåííûå â ìèðå çåìëåòðÿñåíèÿ, ïðèíîñÿùèå íàèáîëü-øèé óùåðá, îáóñëîâëåíû äåôîðìàöèåé çíà÷èòåëüíûõ îáúåìîâ â ëèòîñôåðå ñî ñêîðîñòÿìè $10^{-5}\div10^{-6}$ 1/ãîä.

Òàê, çåìëåòðÿñåíèÿ $K\approx$ 12 äëÿ ñåéñìîãåííîé òåððèòîðèè ïëîùàäüþ 10^5êì^2 áóäóò ïîâòîðÿòüñÿ 50 ðàç ïðè $\dot{\varepsilon} = 10^{-5}$1/ãîä è òîëüêî 1,5 ðàçà ïðè $\dot{\varepsilon} = 10^{-6}$1/ãîä. Íî óæå çåìëå-òðÿñåíèÿ áîëüøåé ýíåðãèè $K\geq$13 ìîãóò èìåòü ìåñòî òîëüêî ïðè ñêîðîñòÿõ äåôîðìàöèè 10^{-6}1/ãîä. Ïðè ýòîì âðåìÿ èõ ïîâòîðåíèÿ áóäåò ïðåâûøàòü 100 ëåò.

Åñëè âíóòðè áîëüøîé îáëàñòè ñ ìàëîé ñêîðîñòüþ äåôîðìàöèè âîçíèêàåò íåáîëüøîé îáúåì, äåôîðìèðóåìûé áûñòðåå, ñèòóàöèÿ, åñòåñòâåííî, óñëîæ-íÿåòñÿ, è ïî äàííûì î ïîâòîðÿåìîñòè çåìëåòðÿñåíèé áåç ó÷åòà ðàñïðåäåëåíèÿ â ïðîñòðàíñòâå áóäåò òðóäíî óñòàíîâèòü âåëè÷èíó ìàêñèìàëüíîãî çåìëåòðÿñå-íèÿ äëÿ ðåãèîíà.

Ñáëèæàÿ ïðåäñòàâëåíèÿ î ñòðóêòóðå ðàçðóøåíèÿ òâåðäîãî òåëà è ïðåä-ñòàâëåíèÿ î ñåéñìè÷åñêîì ðåæèìå, óäàåòñÿ âûïîëíèòü ðÿä êîëè÷åñòâåííûõ îöåíîê ðàçìåðîâ ñåéñìîãåííûõ îáëàñòåé è î÷àãîâûõ çîí, à òàêæå óòî÷íèòü ñà-ìó ïîñòàíîâêó çàäà÷è î ìàêñèìàëüíîì çåìëåòðÿñåíèè, âîçìîæíîì â îòäåëü-íîì ðåãèîíå, Ïîêàçàíà çíà÷èìîñòü äàííûõ î ÷àñòîòå ñëàáûõ çåìëåòðÿñåíèé äëÿ õàðàêòåðèñòèêè ñåéñìè÷åñêîãî ðåæèìà.

3.Êðèòåðèè ìåäëåííîãî äâèæåíèÿ è äåñòðóêöèè ñðåäû â çåìíûõ íåäðàõ.

Äâèæåíèå ãîðíûõ ìàññ âûçûâàåòñÿ äåéñòâèåì ãðàâèòàöèîííûõ ñèë íà ðàç-ëè÷àþùèåñÿ ïî ïëîòíîñòè òåëà â êîðå è ìàíòèè, à òàêæå äåéñòâèåì ïðèëèâíûõ âîëí, êîòîðûå, òîðìîçÿ âðàùåíèå Çåìëè âîêðóã îñè, ñíàáæàþò ýíåðãèåé äåôîðìàöèîííûå ïðîöåññû, ãëàâíûì îáðàçîì, â ëèòîñôåðå.

Ðåçóëüòàòîì ýòîãî äâèæåíèÿ ÿâëÿåòñÿ âîçíèêíîâåíèå òåêòîíè÷åñêèõ íà-ïðÿæåíèé, íåðîâíîñòåé çåìíîé ïîâåðõíîñòè è äåñòðóêöèè - íàðóøåíèå ñïëîøíîñòè çåìíîé êîðû. Áëî÷íîå ñòðîåíèå ïîâûøàåò ïîäâèæíîñòü òâåðäûõ îáîëî÷åê Çåìëè, ò.ê. äåôîðìàöèÿ áëîêîâ äîïîëíÿåòñÿ èõ ñìåùåíèåì äðóã îò-íîñèòåëüíî äðóãà.

Ëþáûå ïåðåìåùåíèÿ îãðîìíîãî òåëà â ñðåäå âûçûâàþò äåôîðìàöèþ ñäâèãà íà åãî ãðàíèöå. Ýòà äåôîðìàöèÿ ìîæåò îñóùåñòâëÿòüñÿ ëèáî â ðåæèìå êðèïà, ëèáî ëîêàëèçîâàòüñÿ â óçêîé ïðîòÿæåííîé îáëàñòè ñèëüíî íàðóøåííîé ñïëîøíîñòè, íàçûâàåìîé ðàçëîìîì.

Äåçèíòåãðàöèÿ ñïëîøíîé ñðåäû ïóòåì ðàçâèòèÿ ñåòè òðåùèí â îáúåìå òâåðäîãî òåëà îáóñëîâëåíà ïðèñóòñòâèåì â òåëå ðàçíîìàñøòàáíûõ è ðàçíîðîäíûõ íåîäíîðîäíîñòåé, íà êîòîðûõ ïðè äåôîðìèðîâàíèè òåëà êîíöåíòðèðóþòñÿ íàïðÿæåíèÿ è çàðîæäàþòñÿ òðåùèíû.

Îöåíèì ïàðàìåòðû ìåäëåííîãî äâèæåíèÿ òâåðäîãî òåëà â çåìíûõ íåäðàõ, ïðè êîòîðîì âîçíèêàåò äåçèíòåãðàöèÿ è ôîðìèðóåòñÿ ðàçëîì. Âîñïîëüçóåìñÿ ðàçðàáîòàííûì â ïðåäûäóùåé ãëàâå ïðèìåðîì. Ïóñòü èìååòñÿ ïëîñêèé ñëîé òîëùèíîé L, ãðàíèöû êîòîðîãî ñìåùàþòñÿ äðóã îòíîñèòåëüíî äðóãà ñî ñêîðîñòüþ V. Â ñëó÷àå îäíîîñíîé äåôîðìàöèè åå ñêîðîñòü âíóòðè ñëîÿ áóäåò ðàâíà $\dot{e} = V/L,$ à íàïðÿæåíèÿ íà íåîäíîðîäíîñòÿõ: $\sigma_l = \rho c_t^2 \frac{Vl}{L\nu}$.

Ïåðåïèøåì ïîñëåäíþþ ôîðìóëó â âèäå:

$$\frac{\sigma_l}{\rho c_t^2} = \frac{V}{\nu} \cdot \frac{l}{L}$$

Ëåãêî âèäåòü, ÷òî ñòðóêòóðà íàïðÿæåííûõ íåîäíîðîäíîñòåé â òåëàõ ðàçíîãî ìàñøòàáà L áóäåò ïîäîáíîé, åñëè îäèíàêîâûå íàïðÿæåíèÿ áóäóò íà íåîäíîðîäíîñòÿõ, ðàçìåðû êîòîðûõ ïðîïîðöèîíàëüíû ðàçìåðó òåëà $l/L = \text{const}$. Ïðè ýòîì ñêîðîñòü ñìåùåíèÿ ãðàíè÷íûõ ïîâåðõíîñòåé òåëà V äîëæíà áûòü îäèíàêîâîé, íå çàâèñÿùåé îò âåëè÷èíû òåëà L.

Çàðîäûøè òðåùèí ìîãóò âîçíèêíóòü íà íåîäíîðîäíîñòÿõ, íà êîòîðûõ $\sigma_l/\rho c_t^2$ äîñòèãàåò ïðåäåëà ïðî÷íîñòè ìàòåðèàëà $\sigma^*/\rho c_t^2$.

Îáîçíà÷èì ðàçìåð òàêîé íåîäíîðîäíîñòè l_0. Ðàññòîÿíèå L_0 ìåæäó íåîäíîðîäíîñòÿìè ðàçìåðà l_0 îïðåäåëÿåòñÿ èõ êîíöåíòðàöèåé â îáúåìå:

$$\left(\frac{L_0}{l_0}\right)^3 = \frac{\pi \cdot Q}{2}$$

Áóäåì ñ÷èòàòü, ÷òî äåçèíòåãðàöèÿ òåëà èìååò ìåñòî, åñëè íà òîëùèíå åãî L óêëàäûâàåòñÿ äåñÿòü òðåùèí $L/L_0 = 10$. Ïîäñòàâëÿÿ â ôîðìóëó ïðèâåäåííûå îòíîøåíèÿ, ïîëó÷èì:

$$\frac{\sigma^*}{\rho c_t^2} = \frac{V^*}{\nu}\left(\frac{2}{\pi \cdot Q}\right)^{1/3} \cdot \frac{1}{10}.$$

Ïðî÷íîñòü ãîðíûõ ïîðîä σ^* ìåíÿåòñÿ â øèðîêèõ ïðåäåëàõ, íî îòíîøåíèå $\sigma^*/\rho c_t^2$ ïðàêòè÷åñêè ïîñòîÿííî. Äîáðîòíîñòü â ëèòîñôåðå Çåìëè èìååò ïîðÿäîê 10^2. Äðóãèõ êîíñòàíò ôîðìóëà íå ñîäåðæèò, òàê ÷òî ñêîðîñòü ñìåùåíèÿ ãðàíè÷íûõ ïîâåðõíîñòåé ñëîÿ V^*, ìîæåò ñëóæèòü óíèâåðñàëüíûì êðèòåðèåì äåçèíòåãðàöèè ãîðíûõ ïîðîä â ìàññèâå. Ïðåîáðàçóÿ ïîëó÷åííîå ñîîòíîøåíèå è ïîäñòàâèâ $\sigma^*/\rho c_t^2 = 2 \cdot 10^{-3}$ è $Q = 100$, îöåíèì V^*:

$$V^* = 10\nu\frac{\sigma^*}{\rho c_t^2}\left(\frac{\pi \cdot Q}{2}\right)^{1/3} \approx 6 \text{ ñì/ãîä}.$$

Èñõîäÿ èç ýòîé îöåíêè ìîæíî ïîëàãàòü, ÷òî äåçèíòåãðàöèÿ ãîðíûõ ïîðîä áóäåò íàáëþäàòüñÿ òàì, ãäå ñêîðîñòü ïîäâèæêè ãðàíè÷íûõ ïîâåðõíîñòåé òåëà äîñòèãàåò íåñêîëüêèõ ñàíòèìåòðîâ â ãîä. Ïðè ìåíüøèõ ñêîðîñòÿõ äåôîðìàöèÿ áóäåò îñóùåñòâëÿòüñÿ â ðåæèìå êðèïà.

Ìîæíî îïðåäåëèòü ñðåäíåå íàïðÿæåíèå ñäâèãà τ íà ãðàíè÷íûõ ïîâåðõíîñòÿõ òåëà äëÿ ïðåäåëüíîé ñêîðîñòè èõ ñìåùåíèÿ $V=V^*$:

$$\tau = \rho c_t^2 \frac{\dot{e}}{v}\frac{2}{\pi\cdot Q}\int_0^{l_0} l d\ln l$$

(Â ñëó÷àå êðèïà âåðõíèé ïðåäåë èíòåãðèðîâàíèÿ $l_m = L\left(\frac{2}{\pi\cdot Q}\right)^{1/3}$, à íå l_0.)

$$\tau = \rho c_t^2 \frac{2}{\pi\cdot Q}\frac{\dot{e}l_0}{v} = \rho c_t^2 \frac{2}{\pi\cdot Q}\frac{\dot{e}L}{v}\frac{l_0}{L_0}\frac{L_0}{L}.$$

Ïîäñòàâëÿÿ $\frac{l_0}{L_0} = \left(\frac{2}{\pi\cdot Q}\right)^{1/3}$ è $\frac{L_0}{L} = \frac{1}{10}; \dot{e}L = V^*$, ïîëó÷èì:

$$\tau = \frac{\rho c_t^2}{10}\left(\frac{2}{\pi\cdot Q}\right)^{4/3}\cdot\frac{V^*}{v}.$$

Åñëè ρc_t^2 =5·10^{5}êã/ñì^2; Q=10^2; V^*/v=1/10, òî τ=6êã/ñì^2.

Îáðàùàåò íà ñåáÿ âíèìàíèå î÷åíü íèçêîå íàïðÿæåíèå ñäâèãà íà ãðàíèöå ñëîÿ. Ñòîëü ñëàáàÿ ñîïðîòèâëÿåìîñòü òâåðäîãî òåëà èçìåíåíèþ ôîðìû ïðè ìàëûõ ñêîðîñòÿõ äåôîðìàöèè ñáëèæàåò ýòî òåëî ñ âÿçêîé æèäêîñòüþ, òåì áîëåå, ÷òî è â ñëîå âÿçêîé æèäêîñòè íàïðÿæåíèÿ íà ãðàíèöå ñëîÿ òàê æå ïðîïîðöèîíàëüíû ñêîðîñòè ñìåùåíèÿ ãðàíèöû: $\tau = \eta\frac{V}{L}$, ãäå η - êîýôôèöèåíò äèíàìè÷åñêîé âÿçêîñòè. Ïåðåõîäÿ ê áåçðàçìåðíûì ïàðàìåòðàì, ÷òîáû èìåòü ïðåäñòàâëåíèå î ïîäîáèè ðàçíîìàñøòàáíûõ òå÷åíèé, ïîëó÷èì:

$$\frac{\tau}{\rho V^2} = \zeta(Re),$$ ãäå $Re = \frac{\rho LV}{\eta}$ - ÷èñëî Ðåéíîëüäñà.

Äëÿ ëàìèíàðíîãî òå÷åíèÿ $\zeta(Re) = 1/Re$, à äëÿ òóðáóëåíòíîãî ζ = const. Êðèòåðèåì ïåðåõîäà îò ëàìèíàðíîãî ê òóðáóëåíòíîìó ÿâëÿåòñÿ îïðåäåëÿåìîå â ýêñïåðèìåíòå êðèòè÷åñêîå ÷èñëî Re^*.

Â òâåðäîì òåëå óâåëè÷åíèå ñêîðîñòè ñìåùåíèÿ âûøå êðèòè÷åñêîé ïðèâîäèò ê ïîÿâëåíèþ â îáúåìå òåëà ñèëüíî íàïðÿæåííûõ íåîäíîðîäíîñòåé, íà êîòîðûõ çàðîæäàþòñÿ òðåùèíû. Äåçèíòåãðàöèÿ òàê æå ïðèâîäèò ê íàðóøåíèþ îäíîðîäíîñòè äåôîðìàöèé â òåëå.

Íàïîìíèì, ÷òî ïðè âñåì ñõîäñòâå ýòèõ ÿâëåíèé åñòü ñóùåñòâåííîå ðàçëè÷èå ìåæäó íèìè: â æèäêîñòè ñòðóêòóðà ôîðìèðóåòñÿ çà ñ÷åò êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèè, à â òâåðäîì òåëå - óïðóãîé. Ðàçëè÷íû è ìåõàíèçìû äèññèïàöèè ýíåðãèè.

Â çàêëþ÷åíèå îòìåòèì åùå îäíó îñîáåííîñòü äåôîðìàöèè òâåðäîãî òåëà ïðè ìåäëåííîì äåôîðìèðîâàíèè: îíà ñòðåìèòñÿ ëîêàëèçîâàòüñÿ â óçêîé çîíå. Â ñâåòå èçëîæåííûõ âûøå ïðåäñòàâëåíèé ýòîò ýôôåêò ñëåäóåò îáúÿñíÿòü íå êàêèìè-ëèáî ýíåðãåòè÷åñêèìè âûãîäàìè, à èç ÷èñòî êèíåìàòè÷åñêèõ ñîîáðàæåíèé: ÷åì òîíüøå ñëîé, òåì áûñòðåå çàâåðøàåòñÿ äåôîðìàöèÿ, ò.ê. â òîíêîì ñëîå âûøå ñêîðîñòü äåôîðìàöèè $\dot{e} = V/L$.

4. Î ðåæèìå îïîëçíåé íà ãîðíûõ ñêëîíàõ.

Ïåðåíîñ ìàññ ïî ñêëîíàì ïîä äåéñòâèåì ñèëû òÿæåñòè - îäèí èç àêòèâíûõ ðåëüåôîîáðàçóþùèõ ïðîöåññîâ.

Ýðîçèîííûå ïðîöåññû âåñüìà ðàçíîîáðàçíû. Íàèáîëåå îïàñíûìè äëÿ ÷åëîâåêà ÿâëÿþòñÿ ñåëè, ëàâèíû, îïîëçíè. Ñåëè è ëàâèíû âîçíèêàþò òàì, ãäå âîçìîæíî íàêîïëåíèå ðûõëîãî ìàòåðèàëà íà âåðõíèõ óðîâíÿõ ñêëîíîâ è äîëèí. Ïîä âîçäåéñòâèåì çåìëåòðÿñåíèé èëè îáèëüíîãî óâëàæíåíèÿ ñêîïëåíèå ðûõëîãî ìàòåðèàëà òåðÿåò óñòîé÷èâîñòü è, äâèãàÿñü ïî ñêëîíó, óâëåêàåò ñâîþ ìàññó. Òàêèì îáðàçîì ëàâèíà èëè ñåëü íàðàùèâàþò ñâîþ ðàçðóøèòåëüíóþ ýíåðãèþ.

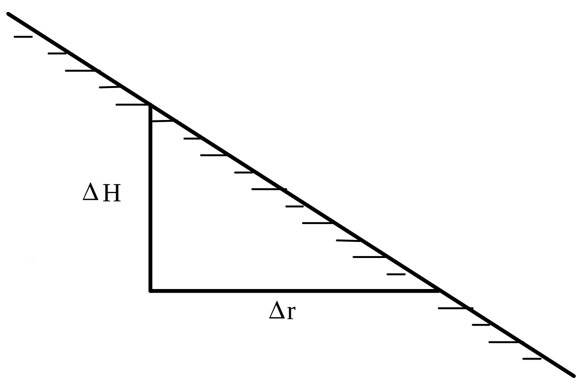
Èíà÷å îáñòîèò äåëî ñ îïîëçíÿìè. Ïîäãîòîâêà èõ èäåò ñêðûòíî è îáóñëîâëåíà äåôîðìàöèåé ìàññèâà âáëèçè ñêëîíà. Ìîæíî íàáëþäàòü ñêëîíû, õðàíÿùèå ñëåäû ìíîãî÷èñëåííûõ îïîëçíåé, ÷òî ñâèäåòåëüñòâóåò î ðåãóëÿðíîñòè ýòîãî ïðîöåññà. Õîòÿ êàæäîå îòäåëüíîå ñîáûòèå ìîæåò áûòü âûçâàíî çåìëåòðÿñåíèåì èëè èçìåíåíèåì âîäíîãî ðåæèìà, èõ íåëüçÿ ñ÷èòàòü ïðè÷èíîé âîçíèêíîâåíèÿ îïîëçíåé.

Ïîäãîòîâêà îïîëçíÿ íà÷èíàåòñÿ ñ ôîðìèðîâàíèÿ ãðàíèöû, îòäåëÿþùåé íåêîòîðûé îáúåì ãîðíîé ìàññû îò ìàññèâà, âáëèçè êîòîðîé ëîêàëèçóåòñÿ ñäâèãîâàÿ äåôîðìàöèÿ. Âäîëü ýòîé ãðàíèöû ïîâûøàåòñÿ ïîðèñòîñòü è ïðîíèöàåìîñòü. Â ñëó÷àå íàñûùåíèÿ ýòîé çîíû ñîïðîòèâëåíèå ñäâèãó ìîæåò óïàñòü ïðàêòè÷åñêè äî íóëÿ, ÷òî è âûçîâåò îïîëçåíü.

Äåôîðìàöèîííûé ïðîöåññ, â ðåçóëüòàòå êîòîðîãî ôîðìèðóåòñÿ òåëî îïîëçíÿ, ïðîòåêàåò î÷åíü ìåäëåííî è ñîïðîâîæäàåòñÿ äåçèíòåãðàöèåé ñïëîøíîé ñðåäû.

Ðîëü ãîðíîãî ðåëüåôà ïðè ôîðìèðîâàíèè îïîëçíÿ âûÿâëÿåòñÿ èç óñëîâèÿ ðàâíîâåñèÿ ñèë, äåéñòâóþùèõ íà îòäåëÿåìûé îò ìàññèâà áëîê (ñì. ðèñ.5).

Ðèñ.5.



Ñèëû, äåéñòâóþùèå âäîëü ãðàíèö ïðîòÿæåííîñòüþ ΔH è Δr ðàâíû ñîîòâåòñòâåííî $\sigma\Delta H$ è $\sigma\Delta r$. Èõ ïðîåêöèÿ íà ëèíèþ ñêëîíà, âäîëü êîòîðîé ïðîèñõîäèò äâèæåíèå ãîðíîé ìàññû, äîëæíà ðàâíÿòüñÿ ïðîåêöèè ñèëû òÿæåñòè:

$$-\sigma\cdot\sqrt{\Delta H^2+\Delta r^2} = \frac{\Delta r\cdot\Delta H}{2}\rho g\frac{\Delta H}{\sqrt{\Delta H^2+\Delta r^2}}$$

Çäåñü ρ - ïëîòíîñòü ãîðíîé ìàññû, g - óñêîðåíèå ñèëû òÿæåñòè.

Ïîñëå ïðåîáðàçîâàíèé, ïîëàãàÿ $|\Delta H/\Delta r| < 0{,}5$ è ïðåíåáðåãàÿ $(\Delta H/\Delta r)^2$ ïî ñðàâíåíèþ ñ åäèíèöåé, îïðåäåëèì ëèíåéíûé ðàçìåð áëîêà $L = \Delta H$:

$$L \approx \Delta H = \frac{2\sigma}{\rho g} \cdot \frac{1}{|\Delta H/\Delta r|}$$

Ðàçìåð îïîëçíåâîãî áëîêà çàâèñèò îò êðóòèçíû ñêëîíà è íàïðÿæåíèÿ ñäâèãà â ñëîå L. Îïàñíîñòü âû÷ëåíåíèÿ áëîêà âîçíèêàåò òîãäà, êîãäà ñêîðîñòü äâèæåíèÿ ïî ñêëîíó äîñòèãàåò V=6ñì/ãîä. Ýòîìó çíà÷åíèþ ñêîðîñòè ñîîòâåòñòâóåò íàïðÿæåíèå ñäâèãà

$$\sigma = \rho c_t^2 \left(\frac{2}{\pi \cdot Q}\right)^{4/3} \cdot \frac{V^*}{v} \cdot \frac{1}{10}.$$

Ïîäñòàâëÿÿ ρc_t^2 = 10^5êã/ñì^2; $\pi Q/2$ = 100, ïîëó÷èì:

σ = $10^5 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-1}$= 2êã/ñì^2. Íàéäåííàÿ âåëè÷èíà íàïðÿæåíèÿ ñäâèãà ïîçâîëÿåò îïðåäåëèòü ðàçìåð îïîëçíåâîãî áëîêà (ρ = 2 ã/ñì^3):

$$L = 20\frac{1}{|\Delta H/\Delta r|} \text{ ì.}$$

Âðåìÿ ïîäãîòîâêè îïîëçíåâîãî ÿâëåíèÿ îïðåäåëÿåòñÿ âðåìåíåì äåçèíòåãðàöèè ãîðíûõ ïîðîä â òåëå áëîêà. Ëîêàëèçàöèÿ ñäâèãîâîé äåôîðìàöèè ïî ãðàíèöàì áëîêà çàíèìàåò îòíîñèòåëüíî ìàëî âðåìåíè â ñèëó óìåíüøåíèÿ ðàçìåðîâ äåôîðìàöèîííîé çîíû è ñîîòâåòñòâóþùåãî óâåëè÷åíèÿ ñêîðîñòè äåôîðìàöèè. Äåçèíòåãðàöèîííûé ïðîöåññ â îáúåìå îáû÷íî çàâåðøàåòñÿ ôîðìèðîâàíèåì áëî÷íîé ñòðóêòóðû ïðè ñðåäíåé äåôîðìàöèè, èçìåðÿåìîé ïåðâûìè ïðîöåíòàìè.

Òàêèì îáðàçîì, âðåìÿ ïîäãîòîâêè îïîëçíÿ ïî ïîðÿäêó âåëè÷èíû ìîæåò áûòü îöåíåíî ïî ôîðìóëå:

$$\Theta = \frac{L}{V^*}\varepsilon^*$$

Ïîëàãàÿ íåîáõîäèìóþ äëÿ çàâåðøåíèÿ ïðîöåññà äåçèíòåãðàöèè îáùóþ äåôîðìàöèþ òåëà â ïðåäåëàõ áóäóùåãî áëîêà ε^* = 0,01 è $\Delta H/\Delta r$ = 0,5, ïîëó÷èì:

$$\Theta = \frac{40}{0{,}06} \cdot 0{,}01 \approx 6 \text{ ëåò.}$$

Ñ óìåíüøåíèåì êðóòèçíû âðåìÿ ïîäãîòîâêè óâåëè÷èâàåòñÿ âìåñòå ñ ðàçìåðàìè áëîêà.

Ïðè îïîëçíå ïðîèñõîäèò ïðàêòè÷åñêè ìãíîâåííîå ïåðåìåùåíèå ìàññû áëîêà íà ðàññòîÿíèå, ðàâíîå åãî ðàçìåðó. Åñëè îòíåñòè ýòî ðàññòîÿíèå êî âðåìåíè ïîäãîòîâêè îïîëçíÿ, ïîëó÷èì ýôôåêòèâíóþ ñêîðîñòü ìàññîïåðåíîñà ïîñðåäñòâîì îïîëçíåé:

$$V_{ýô}=\frac{L}{\Theta} = \frac{V^*}{\varepsilon^*} = \text{ 6 ñì/ãîä} \cdot 100 = 6 \text{ ì/ãîä.}$$

Êàê âèäíî íà ýòîì ïðèìåðå, ýôôåêòèâíàÿ ñêîðîñòü ìàññîïåðåíîñà â ñëîå òîëùèíîé L äîñòèãàåò çàìåòíîé âåëè÷èíû.

Èçëîæåííàÿ ñõåìà ïîäãîòîâêè îïîëçíÿ ìîæåò ñëóæèòü îñíîâîé ðàííåé äèàãíîñòèêè îïîëçíåâîé îïàñíîñòè.

5. Ãîðèçîíòàëüíûå ñèëû íàðóøåííîé ñïëîøíîñòè â çåìíîé êîðå.

Äâèæåíèå, ïðè êîòîðîì ìîãëè áû âîçíèêíóòü ãîðèçîíòàëüíûå ñèëû äåçèíòåãðèðîâàííîé ãîðíîé ïîðîäû, äîëæíî áûòü íàïðàâëåíî ïðàêòè÷åñêè âäîëü ýêâèïîòåíöèàëüíîé ïîâåðõíîñòè. Ýòî îçíà÷àåò, ÷òî ñîîòâåòñòâåííîå ãðàâèòàöèîííîå ïîëå òàêîå äâèæåíèå íå ìîæåò îáåñïå÷èòü ýíåðãèåé. Ðàçóìååòñÿ, ìîæíî ïðèäóìàòü òàêóþ êîíôèãóðàöèþ ïîâåðõíîñòè ñêîëüæåíèÿ äëÿ ëåæàùåé íà íåé äåôîðìèðóåìîé ïëèòû, ÷òîáû ãîðèçîíòàëüíîå äâèæåíèå âîçíèêëî ïîä äåéñòâèåì ñèëû òÿæåñòè, íî ýòî íå áóäåò òèïè÷íûì äëÿ çåìíûõ óñëîâèé.

Âìåñòå ñ òåì, óäèâèòåëüíûì ïðåäñòàâëÿåòñÿ, ÷òî ýôôåêòèâíàÿ òîëùèíà àòìîñôåðû (~ 10êì), ãëóáèíà îêåàíà è òîëùà çåìíîé êîðû âïîëíå ñîïîñòàâèìû. Óäèâèòåëüíî è òî, ÷òî âñå îíè áëèçêè ïî âåëè÷èíå ê òàêîìó õàðàêòåðèñòè÷åñêîìó ëèíåéíîìó ðàçìåðó, êîòîðûé ïîëó÷àåòñÿ ïðè äåëåíèè êâàäðàòà ëèíåéíîé ñêîðîñòè âðàùåíèÿ âîêðóã îñè íà óñêîðåíèå ñèëû òÿæåñòè:

$$\frac{V^2}{g} = \frac{(350\ \text{ì/ñåê})^2}{10\ \text{ì/ñåê}^2} \approx 10^4.\text{ì} = 10\text{êì}$$

Òàêîå ñîâïàäåíèå íàâîäèò íà ðàçìûøëåíèÿ î ðîëè ìåõàíè÷åñêîãî äâèæåíèÿ â ïðîöåññå ôîðìèðîâàíèÿ òîíêèõ ñòðóêòóð ãåîñôåð.

Ñðåäè âîçìîæíûõ îáúÿñíåíèé íàì ïðåäñòàâëÿåòñÿ ïðàâäîïîäîáíûì ñâÿçàòü ýòî ñòðóêòóðèðîâàíèå ñ äåéñòâèåì ïðèëèâíûõ âîëí. Ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ ãðàâèòàöèîííûõ âîëí â òîíêîì ñëîå òÿæåëîé æèäêîñòè ðàâíà $c=(gH)^{1/2}$, ñëåäîâàòåëüíî, â àòìîñôåðå è îêåàíå îíè áóäóò äâèãàòüñÿ ïðàêòè÷åñêè ñî ñêîðîñòüþ âðàùåíèÿ $(gH)^{1/2} = (10\cdot10^4)^{1/2} \approx 330$ ì/ñåê. Èìåÿ òó æå ñêîðîñòü, ÷òî è ïðèëèâíàÿ âîëíà, ãðàâèòàöèîííàÿ âîëíà áóäåò ïðè ñâîåì äâèæåíèè ïîäïèòûâàòüñÿ ýíåðãèåé çà ñ÷åò äåéñòâèÿ ïðèëèâíûõ ñèë.

Î÷åâèäíî, ÷òî ïðè òàêîì "ðåçîíàíñíîì" ðåæèìå ìîæíî ïîëó÷èòü ìàñøòàá ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè äëÿ ñòðóêòóðèðîâàíèÿ ãåîñôåð. Äëÿ êîëè÷åñòâåííûõ îöåíîê, ïîäòâåðæäàþùèõ ýòó äîãàäêó, íóæíî ñïåöèàëüíîå èññëåäîâàíèå, êîòîðîå åùå ïðåäñòîèò ñäåëàòü.

Âåðíåìñÿ ê îáñóæäåíèþ ñòðóêòóðèðîâàíèÿ çåìíîé êîðû. Àìïëèòóäà ñìåùåíèÿ íà ïîâåðõíîñòè òâåðäîé îáîëî÷êè Çåìëè ïðè ïðîõîæäåíèè ïðèëèâíîé âîëíû ðàâíà ïðèìåðíî 0,5ì. Ïî ñðàâíåíèþ ñî ñêîðîñòüþ óïðóãèõ âîëí ïðèëèâíàÿ âîëíà äâèæåòñÿ ìåäëåííî, òàê ÷òî â öåëîì äëÿ Çåìëè äåôîðìàöèÿ åå ìîæåò áûòü îöåíåíà â êâàçèñòàòè÷åñêîì ïðèáëèæåíèè. Îäíàêî íà ýòîì ôîíå ìîãóò âîçíèêíóòü ïåðåìåùåíèÿ â âåðõíèõ ñëîÿõ ëèòîñôåðû, êîòîðûå âíåñóò ñâîé âêëàä â ïðèëèâíîå äâèæåíèå, ïîäîáíî òîìó, êàê ýòî ïðîèñõîäèò â îêåàíå.

Áëî÷íîå ñòðîåíèå çåìíîé êîðû íå ïîçâîëÿåò îòîæäåñòâèòü åå ñ óïðóãîé îáîëî÷êîé. Äëÿ âûÿñíåíèÿ êèíåìàòèêè ïîâåðõíîñòíûõ ñëîåâ â ïðèëèâíîé âîëíå áîëåå âñåãî ïîäõîäèò ìîäåëü òÿæåëîé æèäêîñòè. Ãðàâèòàöèîííàÿ âîëíà â äîñòàòî÷íî ãëóáîêîì ñëîå æèäêîñòè ðàñïðîñòðàíÿåòñÿ ñî ñêîðîñòüþ, çàâèñÿùåé îò äëèíû âîëíû. Àìïëèòóäà êîëåáàíèé áûñòðî óáûâàåò ñ ãëóáèíîé. Äëÿ ñêîðîñòåé ñìåùåíèÿ ÷àñòèö â ãðàâèòàöèîííîé âîëíå èìåþòñÿ ôîðìóëû:

$$v_x = A\omega e^{-kz}\sin(kx-\omega t)$$

$$v_z = A\omega\, e^{-kz}\cos(kx - \omega\, t).$$

Äâèæåíèå âäîëü ïîâåðõíîñòè ñîâìåùåíî ñ íàïðàâëåíèåì îñè x, îñü z íàïðàâëåíà îò ïîâåðõíîñòè â ãëóáèíó æèäêîñòè.

$\omega = \sqrt{k \cdot g}$ -÷àñòîòà êîëåáàíèé; $\lambda = \frac{2\cdot\pi}{k}$ - äëèíà âîëíû; A - àìïëèòóäà.

Ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ ãðàâèòàöèîííîé âîëíû:

$$c = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{g}{k}} = \sqrt{\frac{g\cdot\lambda}{8\pi}}$$

Ïðåäñòàâëÿþò èíòåðåñ òîëüêî òå âîëíû, êîòîðûå áëàãîäàðÿ ñîâïàäåíèþ èõ ñêîðîñòè ñî ñêîðîñòüþ ïðèëèâíîé âîëíû ìîãóò ïîëó÷àòü ìåõàíè÷åñêóþ ýíåðãèþ ïðè ñâîåì äâèæåíèè. Íà ñðåäíèõ øèðîòàõ ñêîðîñòü ðàñïðîñòðàíåíèÿ ïðèëèâíîé âîëíû ~ 350ì/ñåê. Ïîäñòàâèâ ýòó âåëè÷èíó â ôîðìóëû, ïîëó÷èì:

$1/k$ = 48êì; λ=300êì.

Â ðàìêàõ ïðåäëîæåííîé êèíåìàòè÷åñêîé ñõåìû íåòðóäíî îöåíèòü ãëóáèíû, íà êîòîðûõ ìîãóò ðàçûãðàòüñÿ ïðîöåññû äåçèíòåãðàöèè òâåðäîé ñðåäû.

Áåãóùèå ïîâåðõíîñòíûå âîëíû çà îäèí öèêë íåîáðàòèìî ïåðåíîñÿò ÷àñòèöû â íàïðàâëåíèè äâèæåíèÿ âîëíû íà âåëè÷èíó ïîðÿäêà A/Q, ãäå Q - äîáðîòíîñòü òâåðäîãî òåëà - çåìíîé êîðû.

Òàê êàê àìïëèòóäà óìåíüøàåòñÿ ñ ãëóáèíîé, ïðîèñõîäèò ìåäëåííîå ñìåùåíèå âåðõíèõ ñëîåâ îòíîñèòåëüíî íèæíèõ. Ýòó òèïè÷íî ñäâèãîâóþ äåôîðìàöèþ ìîæíî âáëèçè ïîâåðõíîñòè ïîëàãàòü ðàâíîé ïðîèçâîäíîé ïî z:

$$\varepsilon = \frac{1}{Q}\cdot\left.\frac{d\left(Ae^{-kz}\right)}{dz}\right|_{z=0} = \frac{A\cdot k}{Q}$$

Çà ãîä ñîâåðøàåòñÿ 730 öèêëîâ, òàê ÷òî ñêîðîñòü äåôîðìàöèè áóäåò ðàâíà:

$$\dot{\varepsilon} = 730\frac{A\cdot k}{Q} \text{ 1/ ãîä}$$

Ñêîðîñòü ïîäâèæêè ïîâåðõíîñòè ïî îòíîøåíèþ ê ñëîþ íà ãëóáèíå H âîçðàñòàåò ñ ãëóáèíîé:

$$V = \dot{\varepsilon}H = 730\frac{Ak}{Q}H.$$

Íàðóøåíèå ñïëîøíîñòè ìîæåò âîçíèêíóòü â ñëîå H â òîì ñëó÷àå, åñëè ïîâåðõíîñòü áóäåò ñìåùàòüñÿ ñ îòíîñèòåëüíîé ñêîðîñòüþ V^*=6ñì/ãîä. Îòñþäà ïîëó÷àåì ìèíèìàëüíóþ ãëóáèíó, íà÷èíàÿ ñ êîòîðîé â çåìíîé êîðå âîçìîæíà äåçèíòåãðàöèÿ ïîä äåéñòâèåì ïðèëèâíûõ ñèë:

$$H = V^*\frac{Q}{A\cdot k\cdot 730}$$

Ïðèíèìàÿ V^* = 6ñì/ãîä; Q = 100; A = 5ñì; 1/k = 48êì, íàõîäèì: $H \approx$ 8êì.

Åñëè âêëàä ãðàâèòàöèîííîé âîëíû â ïðèëèâíîå äâèæåíèå ñîñòàâèò ìåíåå 10%(5ñì), òî ãëóáèíà ñëîÿ äåçèíòåãðàöèè óâåëè÷èòñÿ. Ê ñîæàëåíèþ, íàì íå èçâåñòíû ïîïûòêè âûäåëèòü íà çàïèñÿõ ïðèëèâíîé âîëíû ñîáñòâåííóþ ãðàâèòàöèîííóþ âîëíó.

Ãëàâà IV. Äèôôåðåíöèàöèÿ âåùåñòâà â Çåìëå

Íàëè÷èå òÿæåëîãî ÿäðà ñâèäåòåëüñòâóåò î äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà óæå ïîñëå çàâåðøåíèÿ ôîðìèðîâàíèÿ ïëàíåòû Çåìëÿ, êîãäà åå ìàññà äîñòèãëà ïðàêòè÷åñêè ñîâðåìåííîé âåëè÷èíû. Âîçíèêíóâ â ðåçóëüòàòå ñëèïàíèÿ òåë, ïåðâè÷íàÿ Çåìëÿ èìåëà, åñòåñòâåííî, íåîäíîðîäíûé âåùåñòâåííûé ñîñòàâ è, êàê ñëåäñòâèå, èìåëà â òåëå ïëîòíîñòíûå íåîäíîðîäíîñòè ðàçíîãî ìàñøòàáà. Â ñîáñòâåííîì ãðàâèòàöèîííîì ïîëå ýòè íåîäíîðîäíîñòè ñîçäàëè îãðîìíûé çàïàñ ïîòåíöèàëüíîé ýíåðãèè. Äèôôåðåíöèàöèÿ âåùåñòâà è ñâÿçàííûå ñ íåé äâèæåíèå è íàãðåâ òâåðäîé ñðåäû ïðåîáðàçóþò âíóòðåííåå ñòðîåíèå Çåìëè, ôîðìèðóÿ óñòîé÷èâûå ñòðóêòóðû è ýíåðãåòè÷åñêèå ïîòîêè. Ïðåäñòàâëÿåò èçâåñòíûé èíòåðåñ îöåíêà ðîëè, êîòîðóþ èãðàåò ïðîöåññ äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà â ñîâðåìåííóþ ýïîõó, à òàêæå êàê è â ÷åì îí ïðîÿâëÿåòñÿ. Ïîñêîëüêó ðå÷ü èäåò î çàïàñå ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè, ðåàëèçóåìîé â ïðîöåññå äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà, åñòåñòâåííî èñïîëüçîâàòü â ïåðâóþ î÷åðåäü ìåõàíè÷åñêóþ ìîäåëü ýòîãî ïðîöåññà.

Ïðåäñòàâèì ïðîñòåéøóþ ìîäåëü äâèæåíèÿ ïëîòíîñòíûõ íåîäíîðîäíîñòåé â òâåðäîé ñðåäå â ãðàâèòàöèîííîì ïîëå Çåìëè, êîòîðàÿ ïîçâîëèëà áû â ñàìîì îáùåì âèäå âûïîëíèòü êîëè÷åñòâåííûå îöåíêè ïàðàìåòðîâ ìåõàíè÷åñêîãî äâèæåíèÿ è òåïëîâûõ ýôôåêòîâ, ñ íèì ñâÿçàííûõ.

1. Â îñíîâå ìåõàíè÷åñêîé ìîäåëè äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà ëåæàò ïðåäñòàâëåíèÿ î ïëîòíîñòíîé íåîäíîðîäíîñòè ïåðâè÷íîé Çåìëè. Äîñòàòî÷íûõ ýêñïåðèìåíòàëüíûõ äàííûõ äëÿ ýòîãî â íàøåì ðàñïîðÿæåíèè íåò. Ïîýòîìó âîñïîëüçóåìñÿ ñòðóêòóðîé íåîäíîðîäíîñòåé, êîòîðàÿ âîçíèêàåò â ïðîöåññå ñëó÷àéíîãî ñëèïàíèÿ òÿæåëûõ è ëåãêèõ òåë îäèíàêîâîãî ðàçìåðà. (Ýòà èäåÿ áûëà ïîäñêàçàíà Ê.Å.Ãóáêèíûì.) Ñïîñîá, êàêèì áûëà ïîñòðîåíà ñòðóêòóðà, èçëîæåí â ïðèëîæåíèè. Îòìåòèì êà÷åñòâåííóþ îñîáåííîñòü òàêîãî ðîäà ñòðóêòóð. Â ñðåäå, ñîñòàâëåííîé èç ëåãêèõ è òÿæåëûõ êóáèêîâ îäèíàêîâîãî ðàçìåðà òàê, ÷òî âåðîÿòíîñòü âñòðå÷è ñ êóáèêîì êàæäîãî ñîðòà ïðè ïðîñòðàíñòâåííîì ñêàíèðîâàíèè ñðåäû ðàâíà îäíîé âòîðîé, ñ óìåíüøåíèåì ðàçðåøàþùåé ñïîñîáíîñòè ñêàíèðóþùåãî óñòðîéñòâà îáíàðóæèâàåòñÿ íàðÿäó ñ îáúåìàìè, èìåþùèìè ïðèáëèçèòåëüíî ñðåäíþþ ïëîòíîñòü, óñòîé÷èâàÿ äîëÿ îáúåìîâ ïîâûøåííîé è ïîíèæåííîé ïëîòíîñòè. Åñëè ðàçðåøàþùóþ ñïîñîáíîñòü îïðåäåëÿòü ðàçìåðîì ñêàíèðóþùåãî ïÿòíà â åäèíèöàõ äëèíû ðåáðà áàçèñíîãî êóáèêà, òî îòëè÷èå ïëîòíîñòè òÿæåëîãî è ëåãêîãî îáúåìîâ îò ñðåäíåãî áóäåò îáðàòíî ïðîïîðöèîíàëüíî ðàçðåøàþùåé ñïîñîáíîñòè. Äðóãèìè ñëîâàìè, óâåëè÷èâàÿ îáúåì, â ïðåäåëàõ êîòîðîãî ïðîèçâîäèòñÿ óñðåäíåíèå ïëîòíîñòè, ïîëó÷àåì ðàçëè÷èå â ïëîòíîñòÿõ ñëó÷àéíî âûáðàííûõ îáúåìîâ, êîòîðîå óìåíüøàåòñÿ îáðàòíî ïðîïîðöèîíàëüíî èõ ëèíåéíîìó ðàçìåðó. Ïðè ýòîì ÷àñòîòà âñòðå÷è ñ íåéòðàëüíûì (ñî ñðåäíåé ïëîòíîñòüþ), òÿæåëûì è ëåãêèì îáúåìîì â òàêîé ñðåäå ñîõðàíÿåòñÿ íà âñåõ ìàñøòàáíûõ óðîâíÿõ.

Îáîçíà÷èì ëèíåéíûé ðàçìåð áàçèñíîãî êóáèêà L_*. Ïëîòíîñòü òÿæåëîãî áàçèñíîãî êóáèêà ïðèìåì ðàâíîé 8ã/ñì^3, à ëåãêîãî - 2ã/ñì^3, òàê ÷òî ñðåäíÿÿ ïëîòíîñòü ñðåäû, ñëîæåííîé èç ýòèõ êóáèêîâ, îêàæåòñÿ ðàâíîé 5ã/ñì^3. Ðàññìîòðèì â ýòîé ñðåäå îáúåìû ðàçíîãî ëèíåéíîãî ðàçìåðà: $L_ê=2^ê L_*$ (ê - ìàñøòàáíûé óðîâåíü). Íà êàæäîì óðîâíå ìîæíî âûäåëèòü îáúåìû ñ ïðèìåðíî ñðåäíåé ïëîòíîñòüþ è îáúåìû ñ ïëîòíîñòüþ, îòëè÷íîé îò ñðåäíåé íà âåëè÷èíó $\pm\Delta\rho_K$. Óñëîâíóþ ãðàíèöó ìåæäó îáúåìàìè, êîòîðûå áóäóò îòíåñåíû ê íåéòðàëüíûì, è òåìè, êîòîðûå áóäåì íàçûâàòü òÿæåëûìè èëè ëåãêèìè íåîäíîðîäíîñòÿìè, î÷åâèäíî, íóæíî ïðîâåñòè òàê, ÷òîáû âåðîÿòíîñòü âñòðå÷è ñ íåéòðàëüíûì îáúåìîì ïðè ñëó÷àéíîé âûáîðêå ðàâíÿëàñü 1/2, ñ òÿæåëûì 1/4 è ñ ëåãêèì òàêæå 1/4. Ïðè ýòîì îêàçûâàåòñÿ, ÷òî äëÿ $L_ê>4L_*$ âûïîëíÿåòñÿ ñëåäóþùåå ñîîòíîøåíèå:

$$\Delta\rho_K = \pm 4\frac{L_*}{L_K} \text{ ã/ñì}^3$$

Ïîñòðîåííàÿ ïóòåì ñëó÷àéíîé óêëàäêè îäèíàêîâûõ ïî ðàçìåðó áàçèñíûõ êóáèêîâ (òÿæåëîãî è ëåãêîãî ñ ðàâíîé âåðîÿòíîñòüþ) ñðåäà îáëàäàåò èåðàðõè÷åñêîé ðåãóëÿðíîé ñòðóêòóðîé íåîäíîðîäíîñòåé.

Äîëÿ ïðîñòðàíñòâà, çàíÿòàÿ íåîäíîðîäíîñòÿìè íà êàæäîì óðîâíå èåðàðõèè, îäèíàêîâû: 1/4ëåãêèìè; 1/4òÿæåëûìè.

2. Çàïàñ ïîòåíöèàëüíîé ýíåðãèè ó ëåãêîãî è òÿæåëîãî îáúåìîâ ÿâëÿåòñÿ íåîáõîäèìûì óñëîâèåì âîçíèêíîâåíèÿ äâèæåíèÿ, íî íåäîñòàòî÷íûì. Ñèëà ñîïðîòèâëåíèÿ äâèæåíèþ òåë â êîíäåíñèðîâàííîé ñðåäå ïðîïîðöèîíàëüíà ïîâåðõíîñòè òåëà è ñäâèãîâîìó íàïðÿæåíèþ íà åãî ãðàíèöàõ.

Ïðè ìåäëåííîì äåôîðìèðîâàíèè òâåðäîãî òåëà ðåàëèçóåòñÿ ðåæèì êðèïà (ïîëçó÷åñòè), òàê ÷òî íàïðÿæåíèÿ ñäâèãà áóäóò ïðîïîðöèîíàëüíû ñêîðîñòè äâèæåíèÿ òåëà V:

$$\sigma \sim \rho c^2 \frac{V}{v}\cdot\left(\frac{2}{\pi\cdot Q}\right)^{4/3},$$

ãäå $\rho c^2 = \mu$; $v = 2\cdot10^{-6}$ ñì/ñåê.

Ïîäîáíî âÿçêîé æèäêîñòè, ãäå ñ ïðåâûøåíèåì ñêîðîñòè äâèæåíèÿ âûøå íåêîòîðîãî êðèòè÷åñêîãî çíà÷åíèÿ âîçíèêàåò òóðáóëåíòíîñòü â ïîòîêå, îáòåêàþùåì òåëî; â òâåðäîé ñðåäå, òàê æå ïðè äîñòèæåíèè íåêîòîðîé êðèòè÷åñêîé ñêîðîñòè V^*, ïðîèñõîäèò äåçèíòåãðàöèÿ òâåðäîé ñðåäû â áëèæàéøåé îêðåñòíîñòè òåëà.

Ýòî îáñòîÿòåëüñòâî ïðåäñòàâëÿåòñÿ î÷åíü âàæíûì äëÿ âûäåëåíèÿ òåõ îáúåìîâ ñ îòëè÷íîé îò ñðåäíåé ïëîòíîñòüþ, êîòîðûå ñïîñîáíû ó÷àñòâîâàòü â ìåõàíè÷åñêîé äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà.

Âûäåëåííûå íàìè ñòàòèñòè÷åñêèì àíàëèçîì ðàçíîìàñøòàáíûå ïëîòíîñòíûå íåîäíîðîäíîñòè ïðè ñâîåì äâèæåíèè â ïîëå ñèëû òÿæåñòè áûñòðî "ðàçìîþòñÿ", îáìåíèâàÿñü ñ îêðóæàþùåé ñðåäîé ìàññîé, åñëè òîëüêî â ýòîì äâèæåíèè îíè íå ïðèîáðåòóò ÷åòêèå ôèçè÷åñêèå ãðàíèöû.

Äåçèíòåãðàöèÿ ñðåäû ïî ãðàíèöàì òåëà âîçíèêàåò òîëüêî ïðè äîñòèæåíèè ñêîðîñòè V^*. Ñëåäîâàòåëüíî, âñå òåëà ñ ìåíüøåé ñêîðîñòüþ äâèæåíèÿ ñóùåñòâåííîãî âêëàäà â ïðîöåññ äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà âíåñòè íå ìîãóò.

Îäèíàêîâàÿ ñêîðîñòü äâèæåíèÿ òåë ðàçíîãî ðàçìåðà $V=V^*$ îçíà÷àåò, ÷òî è íàïðÿæåíèÿ ñäâèãà (σ) íà ãðàíèöå ýòèõ òåë òàêæå áóäóò îäèíàêîâû. Ïðèíÿâ $\sigma^*/\rho c_t^2 = 2\cdot10^{-3}$; $Q = 100$; $L/L_0 = 10$; $\rho c_t^2 = 5\cdot10^{12}$ äèí/ñì², ïîëó÷èì:

$$V^* = \nu \frac{\sigma^*}{\rho c_t^2} \frac{L}{L_0} \left(\frac{\pi \cdot Q}{2} \right)^{1/3} \approx 6 \text{ ñì/ãîä.}$$

$$\sigma = \rho c_t^2 \left(\frac{2}{\pi \cdot Q} \right)^{4/3} \cdot \frac{V^*}{\nu} \frac{L_0}{L} \sim 10^7 \text{ äèí/ñì}^2.$$

Ñîñòàâèâ óðàâíåíèå äåéñòâóþùèõ íà íåîäíîðîäíîñòü ñèë, ìîæíî îïðåäåëèòü ðàçìåð áàçèñíîãî êóáèêà L_*, êîòîðûé íîðìèðóåò ïîëó÷åííóþ èåðàðõè÷åñêóþ ñòðóêòóðó.

Ïîëàãàÿ, ÷òî íåîäíîðîäíîñòè èìåþò êóáè÷åñêóþ ôîðìó, ïîëó÷èì ñëåäóþùåå âûðàæåíèå äëÿ îáúåìíîé ñèëû òÿæåñòè:

$$\Delta\rho_K \cdot g L_K^3 = \frac{4L_*}{L_K} g L_K^3 = 4L_* g L_K^2$$

Ïîâåðõíîñòíàÿ ñèëà ñîïðîòèâëåíèÿ äâèæåíèþ ðàâíà íàïðÿæåíèþ ñäâèãà, ïîìíîæåííîìó íà ïëîùàäü ïîâåðõíîñòè òåëà: $10^7 \cdot 6 \cdot L_ê^2$äèí.

Ïðèðàâíèâàÿ îáúåìíóþ è ïîâåðõíîñòíóþ ñèëó, ïîëó÷èì:

$4L_* \cdot 10^3 L_ê^2 = 10^7 \cdot 6 L_ê^2$.

Îòñþäà $L_*=1{,}5 \cdot 10^4$ñì=150ì. Êàê ñëåäóåò èç ïðèâåäåííîãî âûøå áàëàíñà ñèë, äëÿ âñåõ íåîäíîðîäíîñòåé $L_ê > 4L_*$ ($ê > 2$) ðàçìåð $L_ê$ â ëåâîé è ïðàâîé ÷àñòÿõ óðàâíåíèÿ ñîêðàùàåòñÿ. Ýòî îçíà÷àåò, ÷òî íåîäíîðîäíîñòè íà âñåõ óðîâíÿõ èåðàðõèè îäèíàêîâî ÷óâñòâèòåëüíû ê äåéñòâèþ ñèëû òÿæåñòè. Èìååò ìåñòî äèíàìè÷åñêîå ïîäîáèå äâèæóùèõñÿ íåîäíîðîäíîñòåé íà âñåõ óðîâíÿõ ($ê \geq 2$): îäèíàêîâàÿ ñêîðîñòü äâèæåíèÿ, îäèíàêîâûå íàïðÿæåíèÿ íà ãðàíè÷íûõ ïîâåðõíîñòÿõ, îäèíàêîâàÿ âåðîÿòíîñòü âñòðå÷è ñ íåîäíîðîäíîñòüþ â ïðîèçâîëüíîé òî÷êå, ò.ê. íà êàæäîì óðîâíå òÿæåëûå è ëåãêèå çàíèìàþò îäíó è òó æå ÷àñòü ïðîñòðàíñòâà.

Åñòåñòâåííî ïîýòîìó íèçøèì óðîâíåì èåðàðõèè ñ÷èòàòü $ê$=2.

$L_2=4L_*=600$ì. Î âåðõíåì óðîâíå èåðàðõè÷åñêîé ñòðóêòóðû íåîäíîðîäíîñòåé áóäåò ñêàçàíî ïîçæå.

3. Âñå íåîäíîðîäíîñòè âñåõ óðîâíåé íàõîäÿòñÿ â îäèíàêîâûõ óñëîâèÿõ è ïîýòîìó èõ ó÷àñòèå â ïðîöåññå äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà ðàâíîâåðîÿòíî. Íî âñå îíè îäíîâðåìåííî íå ìîãóò íàõîäèòüñÿ â äâèæåíèè - ýòî çàâèñèò îò èõ îêðóæåíèÿ: òÿæåëàÿ èëè ëåãêàÿ íåîäíîðîäíîñòü òîëüêî òîãäà áóäåò äâèãàòüñÿ ïîä äåéñòâèåì ñèë Àðõèìåäà, êîãäà åå áëèæàéøåå îêðóæåíèå áóäåò èìåòü ñðåäíþþ ïëîòíîñòü.

Ïðîäîëæàÿ èñïîëüçîâàòü êóáè÷åñêóþ ôîðìó â êîëè÷åñòâåííûõ îöåíêàõ, áóäåì ñ÷èòàòü, ÷òî áëàãîïðèÿòíîå îêðóæåíèå íåîäíîðîäíîñòè äëÿ ðåàëèçàöèè åå ïîòåíöèàëà ñîñòîèò èç 6 (ïî ÷èñëó ãðàíåé) íåéòðàëüíûõ êóáèêîâ òîãî æå ðàçìåðà. Âåðîÿòíîñòü òàêîé ñèòóàöèè ðàâíî ïðîèçâåäåíèþ âåðîÿòíîñòåé îêàçàòüñÿ â îäíîì ìåñòå îäíîìó òÿæåëîìó (ëåãêîìó) è øåñòè íåéòðàëüíûì êóáèêàì:

$$\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{1}{2} \right)^6 = \frac{1}{256}$$

Òàêèì îáðàçîì, â êàæäûé ìîìåíò âðåìåíè äâèæóùèåñÿ ïëîòíîñòíûå íåîäíîðîäíîñòè êàæäîãî óðîâíÿ çàíèìàþò 1/256 ÷àñòü ïðîñòðàíñòâà è â ñèëó èõ ðàññðåäîòî÷åííîñòè ïðàêòè÷åñêè íå âçàèìîäåéñòâóþò äðóã ñ äðóãîì, ÷èñëî ëåãêèõ, âñïëûâàþùèõ íåîäíîðîäíîñòåé ðàâíî ÷èñëó òÿæåëûõ, òîíóùèõ, ïîýòîìó ìîæíî ïðåäïîëîæèòü, ÷òî íåéòðàëüíûå îáúåìû (ñî ñðåäíåé ïëîòíîñòüþ) îñòàþòñÿ íåïîäâèæíûìè. Ïîòîêè âåùåñòâà ê ïîâåðõíîñòè è ê öåíòðó ïî îáúåìó ñêîìïåíñèðîâàíû.

4. Ñóììàðíûé ìàññîïîòîê â îäíîì íàïðàâëåíèè â ñèëó ïîäîáèÿ äâèæåíèÿ íà âñåõ óðîâíÿõ ðàâåí ïîòîêó íà íèçøåì óðîâíå, óìíîæåííîìó íà ÷èñëî óðîâíåé â èåðàðõè÷åñêîé ñòðóêòóðå. Îäíàêî èçáûòî÷íóþ ìàññó ïåðåíîñÿò ãëàâíûì îáðàçîì íåîäíîðîäíîñòè íèçøåãî óðîâíÿ, à âñå îñòàëüíûå, âìåñòå âçÿòûå, ïåðåíîñÿò åùå ñòîëüêî æå. Ôàêòè÷åñêè ìåõàíè÷åñêàÿ äèôôåðåíöèàöèÿ âåùåñòâà îñóùåñòâëÿåòñÿ ïëîòíîñòíûìè íåîäíîðîäíîñòÿìè ïåðâûõ 3-4 óðîâíåé. Èõ ðàçìåðû: íèçøèé, *ê*=2, L_2=600ì; *ê*=3, L_3=1200ì; *ê*=4, L_4=2400ì; *ê*=5, L_5=4800ì.

Ïåðåíîñ èçáûòî÷íîé ìàññû ê ãðàíèöå ìàíòèè ñ ÿäðîì îñóùåñòâëÿþò îäíîâðåìåííî äâà ïîòîêà: òÿæåëûõ è ëåãêèõ íåîäíîðîäíîñòåé. Òÿæåëûå çàíèìàþò ìåñòî ëåãêèõ, òàê ÷òî ìàññó, äîñòàâëÿåìóþ òîíóùèìè íåîäíîðîäíîñòÿìè, íóæíî óäâîèòü.

Îöåíèì ïåðåíîñ èçáûòî÷íîé ìàññû íà íèçøåì óðîâíå *ê*=2, L_2=600ì. Îáúåì âñåõ äâèæóùèõñÿ íåîäíîðîäíîñòåé îäíîãî óðîâíÿ ðàâåí 1/256 îáúåìà ìàíòèè

$$\sum L_K^3 \approx \frac{10^{27}}{256} \approx 4\cdot 10^{24}\text{ñì}^3$$

×èñëî äâèæóùèõñÿ òÿæåëûõ îáúåìîâ íèçøåãî óðîâíÿ ($L_2=6\cdot10^4$ñì):

$$N_2=\frac{\sum L_K^3}{L_2^3}=\frac{10^{27}}{256\cdot216\cdot10^{12}}=2\cdot10^{10}$$

Âñå îíè îïóñêàþòñÿ ñî ñêîðîñòüþ V^*=6ñì/ãîä. Èíòåðâàë âðåìåíè τ, ïîòðåáíûé äëÿ ïðîõîæäåíèÿ èõ ÷åðåç òîëùó ìàíòèè â 3000 êì, ðàâåí

$$\tau=\frac{3\cdot10^8}{6}=\text{ëåò.}$$

Äîïîëíèòåëüíàÿ òÿæåëûìè íåîäíîðîäíîñòÿìè (L_2) ìàññà ðàâíà èõ îáúåìó, ïîìíîæåííîìó íà $\Delta\rho$=1ã/ñì^3, à ñóììàðíîå åå êîëè÷åñòâî, ïîñòóïàþùåå â ÿäðî îò ïîòîêîâ òÿæåëûõ è ëåãêèõ íåîäíîðîäíîñòåé âñåõ óðîâíåé â 4 ðàçà áîëüøå:

$$\Delta m = 4\cdot\frac{10^{27}}{256}\cdot 1 \approx 1{,}6\cdot10^{25}\text{ã.}$$

Îòíîñÿ ýòó ìàññó êî âðåìåíè τ, ïîëó÷èì ñêîðîñòü íàðàñòàíèÿ ìàññû ÿäðà:

$$\frac{1{,}6\cdot10^{25}}{5\cdot10^7}\approx 3\cdot10^{17}\text{ã/ãîä.}$$

Äëÿ òîãî, ÷òîáû ìàññà ÿäðà äîñòèãëà ñîâðåìåííîé âåëè÷èíû, íóæíî áûëî óâåëè÷èòü ïåðâîíà÷àëüíóþ ìàññó ïðèìåðíî âäâîå, äîáàâèâ 10^{27}ã.

Ìåõàíè÷åñêàÿ äèôôåðåíöèàöèÿ âåùåñòâà ñïîñîáíà äîñòàâèòü ýòó ìàññó ê ÿäðó ëèøü çà $3\cdot10^9$ ëåò.

Ýòà îöåíêà ïîêàçûâàåò, ÷òî ïðîöåññ ôîðìèðîâàíèÿ âíóòðåííèõ ãåîñôåð â ðåçóëüòàòå äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà ïðîòåêàåò ïðàêòè÷åñêè â ñòàöèîíàðíîì ðåæèìå íà ïðîòÿæåíèè âñåé èñòîðèè Çåìëè è íàøà ñîâðåìåííàÿ ýïîõà â ýòîì ïëàíå íå äîëæíà îòëè÷àòüñÿ îò ïðåäøåñòâóþùèõ.

Âñïëûâàíèå ëåãêèõ îáúåìîâ è ïîãðóæåíèå òÿæåëûõ âáëèçè ãðàíèö ëèòîñôåðû ìîæåò âîññîçäàâàòü îáëàñòè íåóñòîé÷èâîãî ñîñòîÿíèÿ â çåìíîé êîðå, êîòîðûå ðåàëèçóþò ñâîþ ýíåðãèþ â äåôîðìàöèîííûõ ïðîöåññàõ.

Çàñëóæèâàåò ñïåöèàëüíîãî îáñóæäåíèÿ è âçàèìîäåéñòâèå ïëîòíîñòíûõ íåîäíîðîäíîñòåé ñ ïðèëèâíûìè âîëíàìè.

5. Ïðåäïîëîæèì ñèëû ñîïðîòèâëåíèÿ, äåéñòâóþùèå íà ïîâåðõíîñòè, äâèæóùååñÿ òåëî ñîâåðøàåò ðàáîòó, êîòîðàÿ âåäåò ê ðàçîãðåâó êàê ñàìîãî òåëà, òàê è îêðóæàþùåé ñðåäû. Åñëè ðàçìåðû òåëà ìàëû, îáëàñòü ïðîãðåâà îêðóæàþùåé ñðåäû îêàçûâàåòñÿ ìíîãî áîëüøå ñàìîãî òåëà, ãðàíèöû òåëà òåðÿþò ÷åòêîñòü è àêòèâíûé ìàññîîáìåí ñ îêðóæàþùåé ñðåäîé ïðèâîäèò ê åãî ðàçìûâàíèþ.

Ìèíèìàëüíûå ðàçìåðû óñòîé÷èâîãî òåëà ïî òåïëîâîìó êðèòåðèþ ìîæíî îöåíèòü èç óñëîâèÿ: ñêîðîñòü äâèæåíèÿ òåëà è òåìïåðàòóðíîãî ôðîíòà äîëæíû áûòü ðàâíû. Ñêîðîñòü äâèæåíèÿ ðàâíà V^*=6ñì/ãîä. Òî, ÷òî ìîæíî íàçâàòü óñëîâíî òåìïåðàòóðíûì ôðîíòîì, îïðåäåëèì ÷åðåç êîýôôèöèåíò òåìïåðàòóðîïðîâîäíîñòè κ^2:

$V_ò=k^2/L$, ãäå L-ðàçìåð íàãðåòîé íåîäíîðîäíîñòè.

Äëÿ ãîðíûõ ïîðîä k^2~3•10^{5}ñì^2/ãîä. Ïðèðàâíèâàÿ ñêîðîñòè $V_ò$ è V^*, ïîëó÷èì

$$L_{\min} = \frac{30\cdot 10^4}{6} = 5\cdot 10^4 \text{ ñì} = 500\text{ì}.$$

Òåëî, äâèæóùååñÿ ñî ñêîðîñòüþ 6ñì/ãîä, áóäåò ñîõðàíÿòü ñâîè ãðàíèöû è ìåõàíè÷åñêóþ óñòîé÷èâîñòü ïðè óñëîâèè, ÷òî åãî ðàçìåðû ïðåâîñõîäÿò 500ì. Ðàçìåð íåîäíîðîäíîñòè íà íèçøåì óðîâíå èñïîëüçóåìîé íàìè èåðàðõè÷åñêîé ñòðóêòóðû ðàâåí 600ì è ýòîìó óñëîâèþ óäîâëåòâîðÿåò.

Âåùåñòâåííàÿ íåîäíîðîäíîñòü äàåò óáûâàþùåå îòëè÷èå ïî ïëîòíîñòè ñ ðîñòîì ðàçìåðà äâèæóùåãîñÿ òåëà. Òàê äëÿ òåë ðàçìåðîì L~100êì ýòî îòëè÷èå ñîñòàâëÿåò ïðèìåðíî 1/1000 ñðåäíåé ïëîòíîñòè. Íî òàêîãî æå ïîðÿäêà èçìåíåíèÿ ïëîòíîñòè ìîãóò âîçíèêíóòü ïðè ðàçíîñòè òåìïåðàòóð âñåãî â100ÎÊ. Ïî ýòîé ïðè÷èíå íóæíî ââåñòè îãðàíè÷åíèå íà ó÷àñòèå â ïðîöåññå ìåõàíè÷åñêîé äèôôåðåíöèàöèè î÷åíü êðóïíûõ òåë. Ïî-âèäèìîìó, âåðõíèé èåðàðõè÷åñêèé óðîâåíü ñëåäóåò îãðàíè÷èòü $\hat{e}$=6, L_6=64êì. Òàêèì îáðàçîì, àêòèâíîå ó÷àñòèå â ìåõàíè÷åñêîé äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà ïðèíèìàþò âñåãî ïÿòü óðîâíåé 2<ê<6.

6. Ïîãðóæàþùèåñÿ è âñïëûâàþùèå òåëà îäíîãî ðàçìåðà ñ îäèíàêîâûìè $\Delta\rho$ ïîëó÷àþò ïðè ñâîåì äâèæåíèè îäíó è òó æå ýíåðãèþ, íî èõ ðàçîãðåâ ïðè ïðîõîæäåíèè âñåé òîëùè ìàíòèè áóäåò ðàçëè÷íûì, ò.ê. èõ íà÷àëüíûå ñîñòîÿíèÿ ðàçëè÷íû.

Îöåíèì òåïëîâîé ïîòîê, êîòîðûé ñîçäàåòñÿ âñïëûâàþùèìè òåëàìè â ðåçóëüòàòå èõ ðàçîãðåâà ïðè äâèæåíèè ñêâîçü òîëùó ìàíòèè.

Ýíåðãèþ äëÿ ðàçîãðåâà òåëî ïîëó÷àåò çà ñ÷åò èçìåíåíèÿ ñâîåãî ãðàâèòàöèîííîãî ïîòåíöèàëà:

$$\Delta\rho_K \cdot L_K^3 \cdot gH, \quad \text{ãäå } H\text{=3000êì}.$$

Ïîëîâèíà ýòîé ýíåðãèè òðàòèòñÿ íà íàãðåâ îêðóæàþùåé ñðåäû, äðóãàÿ ïîëîâèíà îñòàåòñÿ â òåëå. Îòëè÷èå ïëîòíîñòè òåëà îò ñðåäíåãî çíà÷åíèÿ óìåíüøàåòñÿ ñ óâåëè÷åíèåì ñðåäíåãî ðàçìåðà òåëà. Ïîýòîìó äîñòàòî÷íî îïðåäåëèòü ýíåðãèþ òåë íèçøåãî óðîâíÿ, âêëàä êîòîðûõ ñîñòàâëÿåò áîëåå ïîëîâèíû âñåé ïîäâîäèìîé ê ïîâåðõíîñòè ýíåðãèè.

×èñëî òåë íèçøåãî óðîâíÿ (L_2=600ì è $\Delta\rho$=1ã/ñì^2) â ìàíòèè ðàâíî 2•10^{10}. Çà âðåìÿ 5•10^{7}ëåò âñå îíè äîñòèãíóò ïîâåðõíîñòè è êàæäîå ïåðåäàñò ýíåðãèþ:

$(1/2)\cdot\Delta\rho_2\cdot L_2^3 gH=(1/2)\cdot216\cdot10^{12}\cdot10^3\cdot3\cdot10^8=3\cdot10^{25}$ýðã. Òîãäà ñóììàðíûé ïîòîê òåïëà ÷åðåç ïîâåðõíîñòü áóäåò ðàâåí:

$$\frac{2\cdot3\cdot10^{25}\cdot2\cdot10^{10}}{5\cdot10^7}\approx 2\cdot10^{28}\text{ýðã/ãîä.}$$

Òî÷íî òàêàÿ æå ýíåðãèÿ äîëæíà äîñòàâëÿòüñÿ òÿæåëûìè òåëàìè ê ÿäðó è ïðèâîäèòü ê åãî ðàçîãðåâó. Îäíàêî ýòîò ïðîöåññ äîëæåí áûòü îãðàíè÷åí âî âðåìåíè, ò.ê. òåïëîâàÿ åìêîñòü ÿäðà îãðàíè÷åíà. Ïëîòíîñòü ýíåðãèè â òåëàõ íèçøåãî óðîâíÿ (L_2=600ì) ïîñëå ïðîõîæäåíèÿ ÷åðåç ìàíòèþ ðàâíà:

$$\frac{3\cdot10^{25}}{216\cdot10^{12}}\approx1,5\cdot10^{11}\text{ýðã/ñì}^3$$

Î÷åâèäíî, ÷òî ïî ìåðå ïðèáëèæåíèÿ ê ýòîìó çíà÷åíèþ âíóòðåííåé ýíåðãèè ÿäðà ðîñò òåìïåðàòóðû ÿäðà áóäåò çàìåäëÿòüñÿ è â äåéñòâèå âñòóïÿò ðàçëè÷íûå ìåõàíèçìû òåïëîîòâîäà. Õàðàêòåðíîå âðåìÿ èíòåíñèâíîé çàêà÷êè ýíåðãèè â ÿäðî îáúåìîì 10^{26}ñì^3 ðàâíî:

$$\frac{1,5\cdot10^{11}\cdot10^{26}}{2\cdot10^{28}}\approx10^9\text{ëåò.}$$

Åñëè ó÷åñòü òåïëîîòâîä, òî âðåìÿ ýòî äîëæíî ñóùåñòâåííî âîçðàñòè, ò.ê. ñêîðåå âñåãî íàðàñòàíèå òåìïåðàòóðû áóäåò çàìåäëÿòüñÿ ïî ýêñïîíåíòå ñ òåì æå õàðàêòåðíûì âðåìåíåì 10^{9}ëåò.

Ïîñêîëüêó ïîëîâèíà ýíåðãèè ðàññåèâàåòñÿ äâèæóùèìèñÿ òåëàìè â ìàíòèè, ïîñòîëüêó ïðîèñõîäèò åå ðàâíîìåðíûé ïî îáúåìó ðàçîãðåâ. Ýíåðãèÿ, ïîãëîùàåìàÿ ìàíòèåé åæåãîäíî â ðåçóëüòàòå äâèæåíèÿ â íåé òÿæåëûõ è ëåãêèõ òåë, ðàâíà 4•10^{28}ýðã/ãîä.

Åñëè ðàñïðåäåëèòü åå ðàâíîìåðíî ïî îáúåìó Çåìëè, ïîëàãàÿ òåïëîåìêîñòü ðàâíîé 4•10^{7}ýðã/$^{\text{î}}$K•ñì^3, ïîëó÷èì ãîäîâîé ïðèðîñò òåìïåðàòóðû:

$$\frac{4\cdot10^{28}}{4\cdot10^7\cdot10^{27}}=10^{-6}\ {}^{\text{î}}\text{K/ãîä.}$$

Ýòà âåëè÷èíà ïðèðîñòà ñðåäíåé òåìïåðàòóðû ñâèäåòåëüñòâóåò î ñóùåñòâåííîì ýíåðãåòè÷åñêîì âêëàäå ìåõàíè÷åñêîé äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà â òåïëîâûå ïðîöåññû Çåìëè.

7. Ïî ìåðå íàãðåâà Çåìëè âîçðàñòàåò ðîëü êðóïíûõ äâèæóùèõñÿ òåë â ïðîöåññàõ òåïëîïåðåíîñà. Òåëà íèçøåãî èåðàðõè÷åñêîãî óðîâíÿ ñëóæàò ãåíåðàòîðàìè, èñòî÷íèêàìè òåïëà. Êðóïíûå òåëà âûñîêèõ óðîâíåé ïðè ñâîåì äâèæåíèè ìàëî íàãðåâàþòñÿ, íî çàòî ïåðåíîñÿò ïî÷òè íåèçìåííîé ñâîþ âíóòðåííþþ ýíåðãèþ èç îäíîé ÷àñòè ïðîñòðàíñòâà â äðóãóþ. Òàê, ïîãðóæàÿñü, êðóïíûå òåëà îêàçûâàþòñÿ íà áîëüøèõ ãëóáèíàõ áîëåå õîëîäíûìè, ÷åì îêðóæàþùàÿ ñðåäà, è òàêèì îáðàçîì îòáèðàþò ó íåå ÷àñòü ýíåðãèè. Íàîáîðîò, âñïëûâàþùèå êðóïíûå òåëà, ñîõðàíÿÿ ñâîþ íà÷àëüíóþ âíóòðåííþþ ýíåðãèþ, îêàçûâàþòñÿ ñòîëü ñèëüíî ïåðåãðåòûìè, ÷òî â ðåçóëüòàòå ñíèæåíèÿ äàâëåíèÿ áóäåò ðàñïëàâëåíî. Ìîæíî ïîëàãàòü, ÷òî ïðè ðàçíîñòè òåìïåðàòóð íà ãðàíèöå ñ ÿäðîì è âáëèçè ëèòîñôåðû ïîðÿäêà 1000$^{\text{î}}$K òåïëîâûå ïîòîêè, ñâÿçàííûå ñ äâèæåíèåì êðóïíûõ

òåë è âûðàâíèâàþùèå òåìïåðàòóðó â ìàíòèè, áóäóò ñîèçìåðèìû ñ òåïëîì, ïðîèçâîäèìûì äâèæóùèìèñÿ òåëàìè íèçøåãî óðîâíÿ èåðàðõèè. Âàæíî îòìå-òèòü, ÷òî âåùåñòâåííàÿ äèôôåðåíöèàöèÿ ñîïðîâîæäàåòñÿ âîñïðîèçâîäñòâîì íåñòàöèîíàðíûõ òåìïåðàòóðíûõ ïîëåé.

×òî êàñàåòñÿ ðàñïðåäåëåíèÿ òåïëîâûõ èñòî÷íèêîâ â ìàíòèè, òî â ñîîòâåòñòâèè ñ ìî-äåëüþ ìåõàíè÷åñêîé äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà íàèáîëüøåå êîëè÷åñòâî òåïëà äîëæ-íî ïðîäóöèðîâàòüñÿ â âåðõíåé ìàíòèè âáëèçè ãðàíèöû ñ ëèòîñôåðîé.

Ìîäåëü ìåõàíè÷åñêîé äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà äåìîíñòðèðóåò, êàê â ñðåäå, ñëîæåííîé èç ðàçíîðîäíûõ òåë, ñëó÷àéíûì îáðàçîì ðàçìåùåííûõ â ïðîñòðàíñòâå, âîçíèêàåò â ãðàâèòàöèîííîì ïîëå èåðàðõè÷åñêàÿ ñòðóêòóðà òåë ñ çàêîííîìåðíî èçìåíÿþùåéñÿ ïëîòíîñòüþ ïðè ïåðåõîäå îò îäíîãî óðîâíÿ ê äðóãîìó. Ýòà ñòðóêòóðà ðåãóëèðóåò ïðîöåññ äèôôåðåíöèàöèè âåùåñòâà. Åå óñ-òîé÷èâîñòü îáóñëîâëåíà ñàìîâîñïðîèçâîäèìîñòüþ èåðàðõèè, êîòîðàÿ â ñâîþ î÷åðåäü ÿâëÿåòñÿ áàçîé ñòàöèîíàðíûõ ðåæèìîâ.

Ïðèëîæåíèå

Èåðàðõè÷åñêàÿ ñòðóêòóðà, âîçíèêàþùàÿ ïðè óêëàäêå êóáèêîâ îäíîãî ðàçìåðà, íî ðàçíîãî öâåòà, áåëîãî è ÷åðíîãî, ïðè ðàâíîé âåðîÿòíîñòè ñëó÷àéíîãî âûáîðà öâåòà êóáèêà.

Ïîä ñòðóêòóðîé áóäåì ïîíèìàòü ðàñïðåäåëåíèå òåìíûõ è ñâåòëûõ îáúå-ìîâ íà îáùåì ñåðîì ôîíå íà ðàçíûõ ìàñøòàáíûõ óðîâíÿõ.

Ïóñòü â íàøåì ðàñïîðÿæåíèè èìååòñÿ äâà ìåøêà: â îäíîì áåëûå êóáèêè (a_0), â äðóãîì ÷åðíûå (b_0). Âûáèðàòü êàæäûé ðàç êóáèêè áóäåì ïî æðåáèþ è, ïëîòíî óêëàäûâàÿ, áóäåì çàïîëíÿòü áîëüøîé ÿùèê. Â êîíå÷íîì ñ÷åòå êóáèêè ðàçíûõ öâåòîâ îêàæóòñÿ ïåðåìåøàííûìè òàê, ÷òî áîëüøèå îáúåìû â ýòîì ÿùèêå áóäóò êàçàòüñÿ îäíîðîäíî ñåðûìè. Îäíàêî, åñëè íàó÷èòüñÿ ðàçëè÷àòü ïîëóòîíà, òî îäíîðîäíîñòü öâåòîâ ïðèäåòñÿ ïîñòàâèòü ïîä ñîìíåíèå.

Ðàññìîòðèì âàðèàíòû óêëàäêè ÷åðíûõ è áåëûõ êóáèêîâ â êóáè÷åñêèé îáúåì, âìå-ùàþùèé 8 êóáèêîâ. Ïóñòü âíà÷àëå îí çàïîëíåí òîëüêî áåëûìè êóáèêàìè. Çàìåíà îäíî-ãî áåëîãî íà ÷åðíûé ìîæåò áûòü îñóùåñòâëåíà âîñåìüþ ñïîñîáàìè, çàìåíà äâóõ óæå 24 ñïîñîáàìè è ò.ä. Ïðèâåäåì ýòè ÷èñëà â òàáëèöå 2.

Òàáëèöà 2

×èñëî âîçìîæíûõ âàðèàíòîâ ðàñïîëîæåíèÿ
÷åðíûõ è áåëûõ êóáèêîâ â îáúåìå èç 8ìè êóáèêîâ

Ñî÷åòàíèå (a)-áåëûõ è (b)-÷åðíûõ	$8a_0$	$7a_0$ $1b_0$	$6a_0$ $2b_0$	$5a_0$ $3b_0$	$4a_0$ $4b_0$	$3a_0$ $5b_0$	$2a_0$ $6b_0$	$1a_0$ $7b_0$	$8b_0$
×èñëî âàðèàíòîâ	1	8	24	56	78	56	24	8	1

Âñåãî âàðèàíòîâ (2)^8=256. Åñëè ñëåäèòü òîëüêî çà ÷èñëî áåëûìè è ÷èñëî ÷åðíûìè ñî÷åòàíèÿìè, òî îíè â ÿùèêå, ãäå ðàçìåñòèëèñü 8•256~2•10^3 êóáèêîâ, âñòðåòèëèñü áû ïî îäíîìó ðàçó. Ñ óâåëè÷åíèåì îáúåìà âåðîÿòíîñòü òîãî, ÷òî îí áóäåò ñîñòîÿòü èç îäíîöâåòíûõ êóáèêîâ, ñòàíîâèòñÿ íè÷òîæíîé.

Ïîïðîáóåì ââåñòè èíóþ ãðàäàöèþ îáúåìà ïî öâåòó. Áóäåì ñ÷èòàòü îáúåì èç 8 êóáèêîâ ñåðûì, åñëè â íåì ïðåâûøåíèå êîëè÷åñòâà êóáèêîâ îäíîãî öâåòà íàä äðóãèì ìåíüøå èëè ðàâíî 2, ñîîòâåòñòâåííî îñòàëüíûå ðàçîáüåì íà äâå ãðóïïû - ñâåòëûå (a) è òåìíûå (b). Â ýòîì ñëó÷àå âåðîÿòíîñòü îáíàðóæåíèÿ â íàøåì ÿùèêå òåìíûõ èëè ñâåòëûõ áóäåò ðàâíà ~1/7, à ñåðûõ (c)5/7. Èìåííî òàêèå ÷àñòè îáúåìà ÿùèêà áóäóò çàíèìàòü êóáèêè ðàçíîãî öâåòà.

Åñëè òåïåðü èç íîâîãî íàáîðà êóáèêîâ (L_1=2L_0) áóäåì òåì æå ñïîñîáîì èññëåäîâàòü âàðèàíòû ðàñïîëîæåíèÿ òåìíûõ, ñâåòëûõ è ñåðûõ êóáèêîâ â êóáå ñ ëèíåéíûì ðàçìåðîì L_2=2L_1=4L_0, òî ïîëó÷èì ñëåäóþùèé ðåçóëüòàò: âåðîÿòíîñòü ñî÷åòàíèÿ, äàþùåãî íåéòðàëüíóþ, ñåðóþ îêðàñêó, ðàâíà 1/2, à òåìíóþ èëè ñâåòëóþ 1/4. Ïðè ýòîì ñâåòëûå è òåìíûå îáúåìû (L_2^3) ïîáëåêëè ïî ñðàâíåíèþ ñî ñâåòëûìè è òåìíûìè îáúåìàìè (L_1^3) ïðèìåðíî â äâà ðàçà: ÷èñëî èçáûòî÷íûõ áåëûõ è ÷åðíûõ êóáèêîâ íà åäèíèöó îáúåìà, ïðèäàþùèõ èì îòëè÷íóþ îò ñåðîé ñðåäû îêðàñêó, óìåíüøèëîñü âäâîå.

Ïîâòîðÿÿ ýòó ïðîöåäóðó, îáíàðóæèâàåì, ÷òî äîëè îáùåãî îáúåìà, çàíèìàåìûå è íà ñëåäóþùåì óðîâíå (L_3=8L_0) ñâåòëûìè, òåìíûìè è íåéòðàëüíûìè êóáèêàìè, îñòàþòñÿ òîé æå(1/4; 1/4; 1/2). À ÷èñëî èçáûòî÷íûõ ÷åðíûõ è áåëûõ êóáèêîâ â åäèíèöå îáúåìà îêðàøåííûõ êóáèêîâ óáûâàåò ñ èõ ðàçìåðîì ïî çàêîíó:

$$n = \frac{1}{3} \cdot \frac{L_2}{L_k}, \quad \text{ãäå } L_k=2^k L_0.$$

Åñëè ðàññìàòðèâàòü ñðåäó , ñîñòàâëåííóþ èç ÷åðíûõ è áåëûõ êóáèêîâ îäíîãî ðàçìåðà (L_*) êàê áû ñ ðàçíûõ ðàññòîÿíèé, êîãäà ïðîñòðàíñòâåííàÿ ðàçðåøàþùàÿ ñïîñîáíîñòü óìåíüøàåòñÿ, íî ïðè ýòîì ñîîòâåòñòâóþùèì îáðàçîì ïîâûøàòü ÷óâñòâèòåëüíîñòü ê ïîëóòîíàì, òî ïðè ëþáîì ðàçìåðå ðàññìàòðèâàåìîé ÷àñòè ýòîãî ïðîñòðàíñòâà ïåðåä íàìè áóäåò âûðèñîâûâàòüñÿ îäíà è òà æå ïåñòðàÿ êàðòèíà: íà ñåðîì ôîíå ñëó÷àéíûì îáðàçîì ðàçáðîñàíû òåìíûå è ñâåòëûå ïÿòíà. Èåðàðõè÷åñêàÿ ñòðóêòóðà ïðîñòðàíñòâà ñ èçìåíåíèåì ìàñøòàáà îêàçûâàåòñÿ ïîäîáíîé ñàìà ñåáå.

Ðàçóìååòñÿ, äëÿ òîãî, ÷òîáû ýòî óâèäåòü, íóæíî ïî ìåðå óâåëè÷åíèÿ ïîëÿ çðåíèÿ ïîâûøàòü ÷óâñòâèòåëüíîñòü ê ïîëóòîíàì. Îäíàêî â ïðèðîäå ïîäîáíîå ìîæåò ïðîèñõîäèòü ñàìûì åñòåñòâåííûì îáðàçîì.

Òàê, íàïðèìåð, äåéñòâèå ãðàâèòàöèîííûõ ñèë óâåëè÷èâàåòñÿ ñ ðàçìåðîì ïëîòíîñòíûõ íåîäíîðîäíîñòåé â ñðåäå, òàê ÷òî äàæå ìàëîå îòëè÷èå ïî ïëîòíîñòè, íî â áîëüøîì îáúåìå, ñòàíîâèòñÿ çíà÷èìûì äëÿ ìåõàíèêè.

Ãëàâà V. Ãèäðîäèíàìè÷åñêàÿ ñåòü Çåìëè

Ãèäðîñôåðó îáû÷íî îòîæäåñòâëÿþò ñ ìèðîâûì îêåàíîì. Ãèäðîìåõàíèêà îêåàíîâ âïîëíå ñàìîñòîÿòåëüíûé ðàçäåë ãåîìåõàíèêè. Íà ïîâåðõíîñòè ìàòåðèêîâ ðå÷íûå ñòîêè îñóùåñòâëÿþò ïåðåíîñ âìåñòå ñ âîäîé çíà÷èòåëüíûõ ìàññ òâåðäûõ ÷àñòèö, îáðàçóåìûõ âñëåäñòâèå ýðîçèè òâåðäîé ïîâåðõíîñòè, ó÷àñòâóÿ òàêèì îáðàçîì â ïðåîáðàçóþùèõ ëàíäøàôò ïðîöåññàõ.

Â ñâîáîäíîì ñîñòîÿíèè âîäà ïðèñóòñòâóåò è â çåìíûõ íåäðàõ, ïî êðàéíåé ìåðå, â çåìíîé êîðå. Âîäà çàïîëíÿåò ïîðèñòûå ïðîíèöàåìûå ïëàñòû â îñàäî÷íûõ òîëùàõ, ïîëîñòè è òðåùèíû â ñêàëüíûõ ìàññèâàõ.

Íåïðåðûâíîå ïåðåìåùåíèå ìàññ â çåìíûõ íåäðàõ, âîñïðîèçâîäÿùåå äèíàìè÷åñêèå ñòðóêòóðû, ñîçäàåò ïðîòÿæåííûå ñëîè äåçèíòåãðèðîâàííûõ ãîðíûõ ïîðîä, ïðîíèöàåìûå äëÿ æèäêîñòåé. Â ðåçóëüòàòå â íåäðàõ Çåìëè îáðàçóåòñÿ ñåòü êàíàëîâ, ïî êîòîðûì ìîæåò öèðêóëèðîâàòü âîäà, îáåñïå÷èâàÿ âåùåñòâåííûé îáìåí ëèòîñôåðû ñ ãèäðîñôåðîé è àòìîñôåðîé.

Âëèÿíèå âîäû íà ìåõàíè÷åñêèå ñâîéñòâà äåçèíòåãðèðîâàííîé òâåðäîé ñðåäû ïîÿñíèì íà ïðèìåðå ïåñêà. Ñóõîé ïåñîê ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé ñëó÷àéíûì îáðàçîì óëîæåííûå ïåñ÷èíêè, ñèëà ñæàòèÿ â òî÷êàõ êîíòàêòà îïðåäåëÿåòñÿ âåñîì ïåñêà íàä äàííûì ãîðèçîíòîì, ïîäåëåííûì íà ÷èñëî êîíòàêòîâ â íåì. Ñèëû ñöåïëåíèÿ ìåæäó ïåñ÷èíêàìè îòñóòñòâóþò. Ñèëà, ïîòðåáíàÿ äëÿ ñäâèæåíèÿ îäíîãî ñëîÿ ïî äðóãîìó (ñèëà òðåíèÿ), ïðîïîðöèîíàëüíà ñèëå ñæàòèÿ íà êîíòàêòàõ. Âíóòðåííèì òðåíèåì îïðåäåëÿåòñÿ è óãîë ñêëîíà ïåñ÷àíîé ãîðû.

Ïðè óâëàæíåíèè ïåñêà êàïèëëÿðíûå ñèëû âîäíîé ïëåíêè ñâÿçûâàþò ïåñ÷èíêè ìåæäó ñîáîé. Â òàêîì ïåñêå ìîæåò áûòü óñòîé÷èâûì âåðòèêàëüíûé óñòóï íåáîëüøîé âûñîòû.

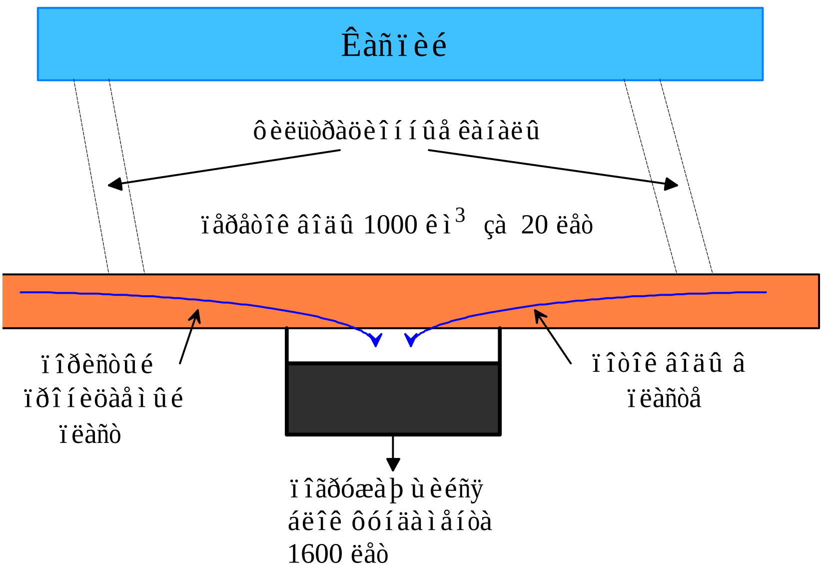
Åñëè â ïåñêå âñå ïîðû çàïîëíèòü âîäîé, òî åãî ïîâåäåíèå áóäåò çàâèñåòü îò òîãî, êàê ðàñïðåäåëåíà íàãðóçêà ìåæäó âîäîé è êîíòàêòàìè ïåñ÷èíîê. Â ñëó÷àå, êîãäà âñÿ íàãðóçêà âîñïðèíèìàåòñÿ ïåñ÷àíûì êàðêàñîì, ïîâåðõíîñòíûé ðåëüåô ñ ïåðåïàäàìè âûñîò íà ïåñ÷àíîì ãðóíòå áóäåò óñòîé÷èâûì, êàê ýòî ìîæíî âèäåòü íà äíå ðåêè.

Åñëè æå ÷àñòü êîíòàêòîâ ìåæäó ïåñ÷èíêàìè ïî êàêèì-ëèáî ïðè÷èíàì áóäåò óòðà÷åíà, íàãðóçêó âîñïðèìåò âîäà è âñëåäñòâèå ýòîãî ñèëà òðåíèÿ áóäåò íàñòîëüêî ìàëîé, ÷òî ïðîèçîéäåò òàê íàçûâàåìîå ðàçæèæåíèå ïåñ÷àíîãî ãðóíòà: óãîë åñòåñòâåííîãî ñêëîíà ïàäàåò äî íóëÿ è ïåñ÷àíàÿ ìàññà, íàñûùåííàÿ âîäîé, ðàñòåêàåòñÿ êàê æèäêîñòü. Ñâîáîäíîå ïåðåìåùåíèå ïåñ÷èíîê â ðàçæèæåííîì ïåñêå ñïîñîáñòâóåò èõ áîëåå ïëîòíîé óêëàäêå è âûòåñíåíèþ âîäû èç ïîð, ÷òî â êîíå÷íîì ñ÷åòå îñòàíîâèò äâèæåíèå ïåñêà. Ýôôåêò ðàçæèæåíèÿ ïåñêà ìîæåò áûòü âûçâàí äèíàìè÷åñêèìè ïîäâèæêàìè íà ãðàíèöàõ èëè âíóòðè ïåñ÷àíîãî îáúåìà. Íàñûùåíèå ïîðèñòîãî òåëà âîäîé âîçìîæíî ïðè íàëè÷èè êàíàëîâ ìåæäó ïîðàìè.

Òå÷åíèå æèäêîñòè ÷åðåç ïîðèñòîå òåëî ìîæåò ñïîñîáñòâîâàòü óâåëè÷åíèþ åãî ïðîíèöàåìîñòè èëè, íàîáîðîò, óìåíüøåíèþ. Ýòî çàâèñèò îò âûìûâàíèÿ èëè îñàæäåíèÿ ìåëêèõ ÷àñòèö â ïîðèñòîì òåëå, ÷òî â ñâîþ î÷åðåäü çàâèñèò îò ñêîðîñòè òå÷åíèÿ æèäêîñòè, ðàçìåðîâ ïîð è ÷àñòèö. Ñóùåñòâóþò è äðóãèå

Ðèñ.6.

Ñõåìà âîäîîáìåíà Êàñïèÿ ñ ïîäçåìíûì ðåçåðâóàðîì.



ìåõàíèçìû èçìåíåíèÿ ïðîíèöàåìîñòè, îáóñëîâëåííûå õèìè÷åñêèì âçàèìîäåéñòâèåì âîäíûõ ðàñòâîðîâ ñ òâåðäûìè ÷àñòèöàìè ðàçíîãî õèìè÷åñêîãî ñîñòàâà.

Äâèæåíèå æèäêîñòè â ïðîíèöàåìûõ òâåðäûõ òåëàõ ïðîèñõîäèò ïîä äåéñòâèåì ãðàäèåíòà äàâëåíèÿ è ñèëû òÿæåñòè. Ïðîèñòûå ïðîíèöàåìûå ñëîè âîçíèêàþò â çîíàõ ñäâèãîâûõ äåôîðìàöèé, íàïðèìåð, íà ãðàíèöàõ áëîêîâ. Äâèæåíèå áëîêîâ îïðåäåëÿåò ñäâèãîâûå íàïðÿæåíèÿ íà èõ ãðàíèöàõ.

×òî êàñàåòñÿ äâèæåíèÿ â ïîðèñòîì ìåæáëîêîâîì ïðîñòðàíñòâå, òî îíî îïðåäåëÿåòñÿ èçìåíåíèåì îáúåìà: ñáëèæåíèåì èëè óäàëåíèåì áëîêîâ äðóã îò äðóãà. Òàê êàê ñðåäíÿÿ ïëîòíîñòü îñòàåòñÿ ïîñòîÿííîé, ýòè ïåðåìåùåíèÿ áëîêîâ äðóã îòíîñèòåëüíî äðóãà èìåþò êâàçèïåðèîäè÷åñêèé õàðàêòåð. Â ãèäðîäèíàìè÷åñêîé ñåòè òàêîå ïåðåìåùåíèå áëîêîâ âûïîëíÿåò ðîëü íàñîñîâ, êîòîðûå ïîääåðæèâàþò åå ôóíêöèîíèðîâàíèå.

Ïî ìíåíèþ Á.Í.Ãîëóáîâà, âîäîîáìåí ñ ïîäçåìíîé ãèäðîñôåðîé ëåæèò â îñíîâå ôåíîìåíà Êàñïèÿ. Â òå÷åíèå ~ 20 ëåò, íà÷èíàÿ ñ 1920ã., íàáëþäàëîñü áûñòðîå ïàäåíèå óðîâíÿ ìîðÿ: áûëî ïîòåðÿíî ` 1000êì^3 âîäû è ïîíèæåíèå äîñòèãëî ~ 2ì. Çàòåì, â òå÷åíèå 35 ëåò óðîâåíü ïîíèçèëñÿ åùå ïðèìåðíî íà ìåòð. Â 1977ã. íà÷àëîñü ïîâûøåíèå óðîâíÿ ñî ñêîðîñòüþ ~0,1ì/ãîä, êîòîðîå ïðîäîëæàåòñÿ äî ñåãî âðåìåíè.

Ïðåäñòàâèì ñõåìó âîäîîáìåíà Êàñïèÿ ñ ãëóáîêèìè ïðîíèöàåìûìè ïîðèñòûìè ñëîÿìè, êîòîðàÿ â îáùèõ ÷åðòàõ âîñïðîèçâîäèëà áû ýòîò ôåíîìåí.

Äîïóñòèì, ÷òî ïîðèñòûé ïëàñò íàõîäèòñÿ íà ãëóáèíå áîëåå 5êì, èìååò ïîðèñòîñòü 0,1 è ïðîíèöàåìîñòü 10^{-11} ì^2. Ïëîùàäü ïëàñòà, àêòèâíî ó÷àñòâóþùàÿ â âîäîîáìåíå ñ Êàñïèåì,~10^6êì^2.

Áóäåì ñ÷èòàòü, ÷òî ãèäðîäèíàìè÷åñêàÿ ñâÿçü ïîäçåìíîãî ðåçåðâóàðà ñ Êàñïèåì ñëàáàÿ è äàâëåíèå âîäû â íåì ìîæåò çàìåòíî îòëè÷àòüñÿ îò ãèäðîñòàòè÷åñêîãî.

Îáìåëåíèå Êàñïèÿ â 20 - 40ãã. ìîãëî ïðîèçîéòè çà ñ÷åò ñáðîñà âîäû â ýòîò ïîäçåìíûé ðåçåðâóàð. Îöåíèì îáúåì ïîðèñòîãî ïðîñòðàíñòâà â ïîäçåìíîì ðåçåðâóàðå, íåîáõîäèìûé äëÿ ðàçìåùåíèÿ 1000êì^3 âîäû. Ïóñòü íà÷àëüíîå äàâëåíèå âîäû â ïîðàõ ðåçåðâóàðà áûëî íà óðîâíå àòìîñôåðíîãî. Ïðè ïîâûøåíèè äàâëåíèÿ äî ãèäðîñòàòè÷åñêîãî íà ãëóáèíå 5 êì (500êã/ñì^2) çà ñ÷åò ñæèìàåìîñòè âîäû ìîæíî â îáúåìå V âìåñòèòü åùå 2,5%V. Òàêèì îáðàçîì íåîáõîäèìûé îáúåì ïîð äëÿ ðàçìåùåíèÿ 1000êì^3 âîäû ñîñòàâèò:

$$V = \frac{1000}{0{,}025} = 4 \cdot 10^4 \ \text{êì}^3.$$

Ïðè ïîðèñòîñòè 0,1 îáúåì ïîðèñòîãî ñëîÿ áóäåò ðàâåí 4•10^5 êì^3. Äåëÿ îáúåì ñëîÿ íà ïëîùàäü, ïîëó÷èì ñðåäíþþ òîëùèíó ñëîÿ:

$$h = \frac{4 \cdot 10^5}{10^6} = 0{,}4\text{êì}.$$

Ñíèæåíèå äàâëåíèÿ â ïîðàõ ïðîíèöàåìîãî ïëàñòà äî àòìîñôåðíîãî ìîãëî áûòü âûçâàíî îïóñêàíèåì îäíîãî èëè íåñêîëüêèõ áëîêîâ êðèñòàëëè÷åñêîãî ôóíäàìåíòà.

Åñëè ïîëàãàòü, ÷òî äî 1920ã. ïåðåòîêà âîäû èç Êàñïèÿ â ïîäçåìíûé ðåçåðâóàð ìîæíî ïðåíåáðå÷ü, òî ëåãêî îöåíèòü âðåìÿ (τ), íåîáõîäèìîå äëÿ ñîçäàíèÿ ðåçåðâíîé åìêîñòè ïëàñòà çà ñ÷åò ñíèæåíèÿ äàâëåíèÿ â íåì. Ñêîðîñòü ïåðåìåùåíèÿ áëîêà ïðèìåì ðàâíîé 6ñì/ãîä, à ïëîùàäü - 100 x 100êì^2.

$$\tau = \frac{10^3\text{êì}^3}{10^4\text{êì}^2 \, 6 \cdot 10^{-5}\text{êì/ãîä}} \approx 1600\text{ëåò}.$$

Ïðè ìåäëåííîì îïóñêàíèè íàä íèì íå âîçíèêàåò ïóñòîòà, ò.ê. ïîäâèæíîñòü âîäíîé ìàññû â ïëàñòå äîñòàòî÷íà äëÿ çàïîëíåíèÿ âíîâü îáðàçóåìîãî îáúåìà âîäîé ïðàêòè÷åñêè ñðàçó æå.

Äëÿ ïëàñòà ñ ïðîíèöàåìîñòüþ 10^{-11}ñì^2 ñêîðîñòü ïîòîêà îïðåäåëÿåòñÿ ôîðìóëîé:

$$V(\text{ñì/ñåê}) = 10^{-2} \frac{\Delta H}{\Delta x}.$$

Ãðàäèåíò äàâëåíèÿ $\Delta H/\Delta x$ âûðàæåí ÷åðåç ðàçíîñòü âûñîò âîäÿíîãî ñòîëáà íà äëèíå Δx.

Îáúåì, îñâîáîæäàåìûé ïðè îïóñêàíèè áëîêà ôóíäàìåíòà çà ãîä, ðàâåí ~0,6êì^3. Ñêîðîñòü ôèëüòðàöèè, êîòîðàÿ ïîçâîëèëà áû çàïîëíèòü ýòîò îáúåì âîäîé çà 1ãîä, ðàâíà óêàçàííîìó îáúåìó, äåëåííîìó íà ñå÷åíèå ïîòîêà ïî âñåìó ïåðèìåòðó áëîêà:

$$V = \frac{0{,}6\text{êì}^3/\text{ãîä}}{4 \cdot 100\text{êì} \cdot 0{,}4\text{êì}} \approx 4 \cdot 10^{-3}\text{êì/ãîä} \approx 10^{-5}\text{ñì/ñåê}.$$

Òàêàÿ ñêîðîñòü äîñòèãàåòñÿ ïðè $\Delta H/\Delta x$ = 10^{-3}, ò.å. ïåðåïàä äàâëåíèÿ íà äëèíå $\Delta x \approx$ 100êì ñîñòàâèò âñåãî 100ì âîäÿíîãî ñòîëáà, ò.å. 10êã/ñì^2.

Âîçíèêøèé ïîä Êàñïèåì ðåçåðâóàð çà ñ÷åò ñíèæåíèÿ äàâëåíèÿ â ïîðàõ ïîäãîòîâèë óñëîâèÿ äëÿ óñèëåíèÿ ôèëüòðàöèîííûõ ïîòîêîâ èç ìîðÿ â ïîðèñòûé ïëàñò è äëÿ îáðàçîâàíèÿ êàíàëîâ â ðàçëîìíûõ çîíàõ, ïî êîòîðûì è ïðîèçîøåë ñáðîñ ìîðñêîé âîäû â ïîäçåìíûé ðåçåðâóàð â 20-40ãã.

Ïîñëå äîñòèæåíèÿ ãèäðîñòàòè÷åñêîãî äàâëåíèÿ íà÷àëàñü ïåðåñòðîéêà â ïîðèñòîì ïëàñòå, ïîäîáíî òîé, êàêàÿ ïðîèñõîäèò â ïåñ÷àíûõ ãðóíòàõ ïðè ðàçæèæåíèè. Ïî ìåðå ïåðåðàñïðåäåëåíèÿ íàãðóçêè íà âîäó è óïëîòíåíèÿ ïîðèñòîãî ñëîÿ äàâëåíèå â âîäå âîçðàñòàëî è äîñòèãëî ê ñåðåäèíå ñåìèäåñÿòûõ ãîäîâ 1000êã/ñì^2 (ëèòîñòàòè÷åñêîå äàâëåíèå ïðèìåðíî â äâà ðàçà âûøå ãèäðîñòàòè÷åñêîãî). Îïóñêàíèå äíà Êàñïèÿ â òå÷åíèå ~35ëåò, ñâÿçàííîå ñ óïëîòíåíèåì ïîðèñòîãî ñëîÿ, âîñïðèíèìàëîñü êàê ïðîäîëæåíèå îáìåëåíèÿ ìîðÿ. Ïðè ñæàòèè âîäû â ïîðàõ ñ 500êã/ñì^2 äî 1000êã/ñì^2 äíî Êàñïèÿ äîëæíî áûëî îïóñòèòüñÿ åùå íà 1 ì (1940 ã. - 1977 ã.). Ïîâûøåíèå äàâëåíèÿ â âîäå ìåíÿåò íàïðàâëåíèå ôèëüòðàöèîííûõ ïîòîêîâ: âîäà ïîñòóïàåò èç ïîäçåìíîãî ðåçåðâóàðà â Êàñïèé. Ñóäÿ ïî òåìïàì ïîäúåìà óðîâíÿ ìîðÿ âîäà äîñòàâëÿåòñÿ ê ïîâåðõíîñòè ïî òåì æå êàíàëàì, ÷òî è â 20 - 40ãã.

Åñëè ýòà ñõåìà îòðàæàåò ïîëîæåíèå âåùåé, ìîæíî ïðåäâèäåòü: íîâûé ñòàáèëüíûé óðîâåíü ìîðÿ áóäåò ïðèìåðíî òàêèì æå, êàê è â 1920ã. Ïîâòîðíîå àíîìàëüíîå êîëåáàíèå óðîâíÿ Êàñïèÿ íåëüçÿ îæèäàòü â áëèæàéøåå âðåìÿ, ò.ê. ïåðèîä "ïîäãîòîâêè", ñâÿçàííîé ñ ïîãðóæåíèåì áëîêîâ ôóíäàìåíòà, äëèòñÿ ~ 1000 ëåò.

Ïðåäñòàâëÿåò îïðåäåëåííûé èíòåðåñ îöåíêà ñêîðîñòè ïåðåäà÷è ñèëîâîãî âîçäåéñòâèÿ ïî ïðîíèöàåìîìó ïëàñòó. Ïóñòü íà ãëóáèíå 5 êì â ïëàñòå ñ ïðîíèöàåìîñòüþ 10^{-11} ì^2 íà îãðàíè÷åííîé ïëîùàäè äàâëåíèå â íàñûùàþùåé ïëàñò âîäå îêàçàëîñü ðàâíûì ëèòîñòàòè÷åñêîìó. Ôèëüòðàöèîííûé ïîòîê èç îáëàñòè âûñîêîãî äàâëåíèÿ áóäåò âûòåñíÿòü âîäó çà ïðåäåëàìè îáëàñòè, íàðàùèâàÿ ñâîþ ìàññó. Â ðåçóëüòàòå îáëàñòü âûñîêîãî äàâëåíèÿ áóäåò ðàñøèðÿòüñÿ, à ñêîðîñòü ïîòîêà ïàäàòü. Îáîçíà÷èì ðàññòîÿíèå ïðîéäåííîå ôðîíòîì ïîâûøåíèÿ äàâëåíèÿ x, òîãäà ïðè çàäàííûõ ïàðàìåòðàõ ïëàñòà ñêîðîñòü ôèëüòðàöèè áóäåò ðàâíà $V=3\frac{5}{x}$, ãäå V â êì/ãîä , à x â êì.Ó÷èòûâàÿ, ÷òî óâåëè÷åíèå ïëîòíîñòè âîäû çà ôðîíòîì ðàâíî â ñðåäíåì 0,0125 ρ, ïîëó÷èì óðàâíåíèå:

$$\frac{dx}{dt} = 80V = \frac{1200}{x}$$

Èíòåãðèðóÿ, íàõîäèì $x \approx 50\sqrt{t}$.Çà 25 ëåò ôðîíò ñèëîâîãî âîçäåéñòâèÿ ïðîäâèíåòñÿ íà 250êì.

Ãëàâà VI. Åñòåñòâåííûå òåëà

1. Äèíàìè÷åñêèå ñòðóêòóðû òâåðäûõ òåë èìåþò èåðàðõè÷åñêîå ñòðîåíèå. Îíè ðàñïðåäåëÿþò ìåõàíè÷åñêóþ ýíåðãèþ ïî ñòåïåíÿì ñâîáîäû òåëà, íàïðàâëÿÿ îò êðóïíûõ ñòðóêòóðíûõ ýëåìåíòîâ ê âñå áîëåå ìåëêèì. Òàêîå ðàñòåêàíèå ýíåðãèè ïî ýëåìåíòàì ñòðóêòóðû êàæäîãî óðîâíÿ ìîæíî ðàññìàòðèâàòü êàê äèññèïàöèþ ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè òåëà.

Íà ïóòè ê àòîìíîé ñòðóêòóðå ýíåðãåòè÷åñêèé ïîòîê ïðîõîäèò ÷åðåç ðÿä ðàçíîìàñøòàáíûõ ðàññåèâàþùèõ óðîâíåé ïî ðàçâåòâëÿþùèìñÿ ðóñëàì.

Ñòðóêòóðèðîâàíèå òâåðäîòåëüíûõ ãåîñðåä ìîæåò ðàññìàòðèâàòüñÿ îäíîâðåìåííî êàê ñàìîîðãàíèçàöèÿ. Ñ òî÷êè çðåíèÿ ìåõàíèêè âñå èåðàðõè÷åñêèå ñòðóêòóðû ðàâíîöåííû, ò.ê. èìåþò îäèíàêîâîå íàçíà÷åíèå.

Â òî æå âðåìÿ ëåãêî çàìåòèòü, ÷òî êàæäàÿ èç íèõ âíîñèò ñâîé îñîáûé âêëàä â ðàçíîîáðàçèå ëàíäøàôòà.

Ôóíêöèîíèðîâàíèå ñòðóêòóðèðîâàííûõ òåë â çåìíûõ íåäðàõ ïðèîáðåòàåò ñâîå öåëåâîå íàçíà÷åíèå ëèøü â ñâÿçè ñ âîñïðîèçâîäñòâîì ñðåäû îáèòàíèÿ. Èìåþùèå ÷åòêî âûðàæåííîå íàçíà÷åíèå ãåîëîãè÷åñêèå ñòðóêòóðû áóäåì íàçûâàòü åñòåñòâåííûìè òåëàìè. Âàæíåéøåé õàðàêòåðèñòèêîé åñòåñòâåííûõ òåë ñëóæèò èõ ýíåðãîìàññîîáìåí ñ îêðóæàþùåé ñðåäîé.

Ïî ðåàêöèè åñòåñòâåííûõ òåë íà âîçäåéñòâèÿ òåõíîãåííûõ ôàêòîðîâ ìîæíî ñóäèòü îá îïàñíîñòè äëÿ ñðåäû îáèòàíèÿ ðàçëè÷íîãî ðîäà èíæåíåðíîé äåÿòåëüíîñòè.

2. Çàòðîíåì êîðîòêî ñóòü íåêîòîðûõ ãåîìåõàíè÷åñêèõ ïðîáëåì, ñâÿçàííûõ ñ èíæåíåðíîé äåÿòåëüíîñòüþ ÷åëîâåêà.

Ñòðîèòåëüñòâî ïëîòèí è çàïîëíåíèå âîäîõðàíèëèù âûçûâàþò äåôîðìàöèþ ìàññèâîâ ãîðíûõ ïîðîä, èíèöèèðóþò ïîäâèæêè áåðåãîâ ðàçëîìîâ, èçìåíÿþò ìåñòíûé ðåæèì ñåéñìè÷íîñòè. Âîçíèêàþò ïðîáëåìû óñòîé÷èâîñòè è äîëãîâå÷íîñòè èíæåíåðíîãî ñîîðóæåíèÿ îñîáîãî ðîäà.

Íåîáõîäèìî îöåíèòü, êàê îòðàçèëîñü âîçâåäåíèå ñîîðóæåíèÿ íà äèíàìè÷åñêîé ñòðóêòóðå ìàññèâà, íà åãî äåôîðìàöèîííîì ðåæèìå: ïðîèñõîäèò àäàïòàöèÿ ïðèðîäíûõ ïðîöåññîâ ê èçìåíåííîìó ëàíäøàôòó èëè ñî âðåìåíåì íàðàñòàþò èçìåíåíèÿ äåôîðìàöèîííîãî ðåæèìà, êîòîðûå ìîãóò âûçâàòü ïåðåñòðîéêó ñòðóêòóð òâåðäûõ òåë? Î÷åâèäíî, ÷òî òîëüêî â ïåðâîì ñëó÷àå ìîæåò èäòè ðå÷ü îá óñòîé÷èâîñòè è äîëãîâå÷íîñòè èíæåíåðíîãî ñîîðóæåíèÿ.

Íåìàëî íîâûõ ãåîìåõàíè÷åñêèõ ïðîáëåì âîçíèêàåò íà òåððèòîðèè îáøèðíûõ íåôòåãàçîíîñíûõ ïðîâèíöèé â ñâÿçè ñ èíòåíñèâíîé äîáû÷åé óãëåâîäîðîäîâ. Èçâëå÷åíèå áîëüøèõ îáúåìîâ íåôòè è ãàçà, çàêà÷êà äëÿ ïîääåðæàíèÿ ïëàñòîâîãî äàâëåíèÿ áîëüøèõ êîëè÷åñòâ âîäû - âñå ýòî îêàçûâàåò çàìåòíîå âëèÿíèå íà äåôîðìàöèîííûå ïðîöåññû â âåðõíèõ ñëîÿõ çåìíîé êîðû, îòìå÷àþòñÿ ñëó÷àè òåõíîãåííûõ çåìëåòðÿñåíèé.

Îòäàëåííûå ïîñëåäñòâèÿ òàêîãî ðîäà âìåøàòåëüñòâà â ïðèðîäíûå ïðîöåññû îñòàþòñÿ äî ñèõ ïîð íåÿñíûìè.

Ìåäëåííûå âçàèìîäåéñòâèÿ ïðîäóêòèâíîãî ïëàñòà ñî âìåùàþùèìè ãîðíûìè ïîðîäàìè â ïðîöåññå ýêñïëóàòàöèè âî âíèìàíèå íå ïðèíèìàþòñÿ, è ñåðüåçíûì èññëåäîâàíèÿì íå ïîäâåðãàþòñÿ.

Ïðè âûñîêèõ òåìïàõ èçâëå÷åíèÿ íåôòè ïîëîâèíà åå îñòàåòñÿ â ïëàñòå íåèçâëå÷åííîé.

Íåãàòèâíûå ýêîëîãè÷åñêèå ïîñëåäñòâèÿ ýêñïëóàòàöèè íåôòåãàçîâûõ ìåñòîðîæäåíèé, ìîãóò ïðîÿâèòüñÿ ÷åðåç äåñÿòèëåòèÿ. Ìåæäó òåì, ó÷åò âçàèìîäåéñòâèÿ ïðîäóêòèâíîãî ïëàñòà ñ îêðóæàþùåé ñðåäîé îáåùàåò ïîâûøåíèå íåôòåîòäà÷è.

3.Êîíòðîëèðóÿ ðåàêöèþ åñòåñòâåííîãî òåëà ïðè âîçäåéñòâèè òåõíîãåííûõ ôàêòîðîâ, ìîæíî ïðåäóïðåäèòü íàðóøåíèå ñëîæèâøåãîñÿ ðàâíîâåñèÿ â ïðèðîäå, êîòîðîå ìîæåò ïðèâåñòè ê îïàñíûì íåãàòèâíûì ïîñëåäñòâèÿì.

Ðàçóìååòñÿ, íå îáÿçàòåëüíî âñÿêîå íàðóøåíèå ðàâíîâåñèÿ â ïðèðîäå áóäåò èìåòü íåãàòèâíûå ïîñëåäñòâèÿ, ìîãóò ñëîæèòüñÿ è áëàãîïðèÿòíûå óñëîâèÿ â ñðåäå îáèòàíèÿ. Íî ïðîãíîç êàðäèíàëüíîé ïåðåñòðîéêè ñòðóêòóðû åñòåñòâåííîãî òåëà ÷åðåç íàðóøåíèå ïðèðîäíîãî ðàâíîâåñèÿ äàæå â îãðàíè÷åííîì ïðîñòðàíñòâå ïîêà ïðåäñòàâëÿåòñÿ ñîâåðøåííî íåðåàëüíûì.

Ïðîìûøëåííàÿ öèâèëèçàöèÿ óìíîæàÿ ñâîþ ìîùü ïîðîäèëà ýêîëîãè÷åñêèé êðèçèñ. Î÷åâèäíî, ÷òî èñïðàâëåíèå ñëîæèâøåéñÿ ñèòóàöèè â ìàòåðèàëüíîé ñôåðå íåâîçìîæíî áåç èñïîëüçîâàíèÿ ýíåðãèè åñòåñòâåííûõ òåë, ó÷àñòâóþùèõ â âîñïðîèçâîäñòâå ñðåäû îáèòàíèÿ. Êðóïíîìàñøòàáíîå ñòðîèòåëüñòâî, ãîðíûå ïðåäïðèÿòèÿ, íåôòÿíûå è ãàçîâûå ïðîìûñëû ïî ñâîåìó âîçäåéñòâèþ íà ïðèðîäíûå ñòðóêòóðû ñïîñîáíû âìåøàòüñÿ â ðàñïðåäåëåíèå ïîòîêà ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè ìåæäó åñòåñòâåííûìè òåëàìè. Äîñòàòî÷íî ñîãëàñîâàòü ñòðàòåãèþ ðàçâèòèÿ ïðîìûøëåííûõ îáúåêòîâ è ýêñïëóàòàöèîííûå ðèòìû ñ ôóíêöèîíèðóþùèìè â ðåãèîíå åñòåñòâåííûìè òåëàìè, ÷òîáû èñêëþ÷èòü íåãàòèâíûå ïîñëåäñòâèÿ è ñîäåéñòâîâàòü âîñïðîèçâîäñòâó óñòîé÷èâûõ äèíàìè÷åñêèõ ñòðóêòóð îêðóæàþùåé ñðåäû.

Óïðàâëåíèå ïîòîêàìè ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè â çåìíûõ íåäðàõ ñíèìàåò ïðîáëåìó îòäàëåííûõ ïîñëåäñòâèé â åå ïðåæíåé ïîñòàíîâêå.

Âîñïðîèçâîäñòâî ñðåäû îáèòàíèÿ äîëæíî ñòàòü öåëüþ îáùåñòâåííîãî ïðîèçâîäñòâà â íîâîì ñòîëåòèè.

Âìåñòî çàêëþ÷åíèÿ

1. Î ñòàöèîíàðíîé Âñåëåííîé.

Ãîìîëîãè÷íîñòü ñòðóêòóð áûëà ïîñòàâëåíà È.Êàíòîì íà óðîâåíü îñíîâîïîëàãàþùèõ èäåé ñòðîåíèÿ ìàòåðèàëüíîãî ìèðà. Ïîðàæàþùåå âîîáðàæåíèå ñõîäñòâî ñòðîåíèé àòîìà è Ñîëíå÷íîé ñèñòåìû â êàêîé-òî ìåðå ìîæíî îáúÿñíèòü òåì, ÷òî èçìåíåíèå ñèëû âçàèìîäåéñòâèÿ ìåæäó òåëàìè ñ ðàññòîÿíèåì ìåæäó íèìè â ãðàâèòàöèîííîì è ýëåêòðè÷åñêîì ïîëÿõ îäèíàêîâî. Âîçìîæíî, îäíàêî, ÷òî èåðàðõèÿ ñòðóêòóð â ìàòåðèàëüíîì ìèðå åñòü áîëåå îáùåå åãî ñâîéñòâî è ïîäîáèå ðàçíîìàñøòàáíûõ ôîðì íåèçáåæíî. Èçäàâíà ñõîäñòâî, ïîäîáèå áûëè îñíîâîé îáîáùåíèÿ ýìïèðè÷åñêîãî çíàíèÿ.

Ðàññìîòðåííûå ïðèìåðû ñòðóêòóðèðîâàíèÿ ìàòåðèàëüíûõ òåë, åñëè ðàñïðîñòðàíèòü ýòó èäåîëîãèþ íà Âñåëåííóþ, çàñòàâëÿþò îòäàòü ïðåäïî÷òåíèå åå ñòàöèîíàðíîìó âàðèàíòó, ïîëàãàÿ, ÷òî âðåìÿ æèçíè Âñåëåííîé íà ïîðÿäêè ïðåâîñõîäÿò âðåìÿ ñóùåñòâîâàíèÿ Ñîëíå÷íîé ñèñòåìû.

Ïðîñòðàíñòâåííûå ñòðóêòóðû äîëæíû âîñïðîèçâîäèòüñÿ íà êàæäîì èåðàðõè÷åñêîì óðîâíå ñ ïåðèîäè÷íîñòüþ, êîòîðàÿ ïðîïîðöèîíàëüíà èõ ðàçìåðàì.

Ñòàöèîíàðíàÿ Âñåëåííàÿ, îáúåäèíÿåìàÿ ãðàâèòàöèîííûì ïîëåì, äîëæíà èìåòü êîíå÷íûå ðàçìåðû. Áóäåì ñ÷èòàòü, ÷òî îäíèì èç óñëîâèé, îãðàíè÷èâàþùèõ åå ðàçìåðû, ÿâëÿåòñÿ íåâîçìîæíîñòü âûõîäà ñâåòîâîãî èçëó÷åíèÿ çà åå ïðåäåëû. ×àñòèöû, ñïîñîáíûå ïðåîäîëåòü òÿãîòåíèå Âñåëåííîé, äîëæíû èìåòü ýíåðãèþ $\frac{GMm}{R}$ (M, R - ìàññà è ðàäèóñ Âñåëåííîé, m - ìàññà ÷àñòèöû) Êâàíò ýëåêòðîìàãíèòíîãî èçëó÷åíèÿ èìååò ýíåðãèþ $h\nu$ (h-ïîñòîÿííàÿ Ïëàíêà, ν- ÷àñòîòà ýëåêòðîìàãíèòíîé âîëíû), êîòîðîé ñîîòâåòñòâóåò ãðàâèòèðóþùàÿ ìàññà $\frac{h\nu}{c^2} = m.$

Ïðèðàâíèâàÿ ýòè ýíåðãèè äðóã äðóãó, ïîëó÷èì:

$$\frac{GMm}{R} = mc^2.$$

Ïî ñîâðåìåííûì îöåíêàì àñòðîôèçèêîâ $M \approx 10^{56}$ã. Ïîäñòàâëÿÿ ýòó âåëè÷èíó â ôîðìóëó, íàõîäèì ðàäèóñ Âñåëåííîé, êîòîðàÿ íå èçëó÷àåò ýíåðãèþ çà ñâîè ïðåäåëû ("÷åðíàÿ äûðà"):

$$R = \frac{GM}{c^2} \approx 10^{28} \text{ ñì}.$$

Ýòî çíà÷åíèå ñîãëàñóåòñÿ ñ îáùåïðèíÿòûì.

Âñå âèäû ìåõàíè÷åñêîãî äâèæåíèÿ âíóòðè Âñåëåííîé ïèòàþòñÿ çà ñ÷åò åå ãðàâèòàöèîííîãî ïîòåíöèàëà. Ïîòîê ýíåðãèè îò êðóïíûõ ñòðóêòóð ê âñå áîëåå ìåëêèì îáåñïå÷èâàåò èõ ïîñòîÿííîå âîñïðîèçâîäñòâî è ñòàöèîíàðíîñòü Âñåëåííîé â öåëîì.

Íà íèçøåì àòîìíîì óðîâíå âåùåñòâî îáëàäàåò îãðîìíîé ýíåðãîåìêîñòüþ - çäåñü â õàîòè÷åñêîì òåïëîâîì äâèæåíèè çàâåðøàåò ñâîé ïóòü ïîòîê ìåõàíè÷åñêîé ýíåðãèè.

Íàêîïèâøóþñÿ òåïëîâóþ ýíåðãèþ íåáåñíûå òåëà â âèäå ýëåêòðîìàãíèòíîãî èçëó÷åíèÿ âûñâå÷èâàþò â êîñìè÷åñêîå ïðîñòðàíñòâî. Óäàëÿÿñü îò öåíòðà Âñåëåííîé, ôîòîíû òåðÿþò ÷àñòü ñâîåé ýíåðãèè â ãðàâèòàöèîííîì ïîëå è, âûõîäÿ çà ïðåäåëû âåùåñòâåííîãî ìèðà, îáðàçóþò ôîòîñôåðó (ïîäîáíî àòìîñôåðå).

Ñæàòàÿ ãðàâèòàöèîííûì ïîëåì ïëàçìà â íåäðàõ çâåçä (ñæàòèå ïðîèñõîäèò ïî ìåðå îòòîêà òåïëîâîé ýíåðãèè èçëó÷åíèåì) ýíåðãèþ ìåõàíè÷åñêîãî äâèæåíèÿ ÷àñòèö ðàñõîäóåò íà ïðåîáðàçîâàíèå ÿäåð. Â ÿäåðíûõ ðåàêöèÿõ ðîæäàþòñÿ âñåïðîíèêàþùèå ÷àñòèöû (íåéòðèíî), êîòîðûå ðàññåèâàþò ýíåðãèþ â êîñìè÷åñêîì ïðîñòðàíñòâå.

Äëÿ ïîääåðæàíèÿ ñòàöèîíàðíîãî ñîñòîÿíèÿ Âñåëåííîé íåîáõîäèìî âîñïðîèçâîäñòâî ÷àñòèö ñ ìàññîé ïîêîÿ. Åñëè ÿäåðíûå ðåàêöèè â íåäðàõ çâåçä ïîæèðàþò ìàññó ïîêîÿ, òî ðîæäåíèå ìàññû ïîêîÿ äîëæíî ïðîèñõîäèòü íà ïåðèôåðèè Âñåëåííîé.

Áûëî áû î÷åíü ñîáëàçíèòåëüíî íàéòè ýòîò ìåõàíèçì âîñïðîèçâîäñòâà ìàññû ïîêîÿ, íî ýòî äåëî äðóãèõ îáëàñòåé íàóêè.

2. Î ðîëè áèîñôåðû â æèçíè Çåìëè.

Æèâîå âåùåñòâî (ïîíÿòèå ââåäåíî Â.Í.Âåðíàäñêèì) áèîñôåðû ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé î÷åíü ñëîæíî ñòðóêòóðèðîâàííóþ ìàòåðèþ. Äîñòèãíóâøèå âûñîêîé ñòåïåíè àâòîíîìèè áåñ÷èñëåííûå îðãàíèçìû æèâîòíîãî è ðàñòèòåëüíîãî ìèðà, íàñåêîìûå è áàêòåðèè, ñîöèàëüíî îðãàíèçîâàííûå è ðàññåÿííûå âî âçàèìîäåéñòâèè äðóã ñ äðóãîì îñóùåñòâëÿþò ñòàöèîíàðíûé ïðîöåññ ñâîåãî âîñïðîèçâîäñòâà. Âîâëåêàÿ â êðóãîîáîðîò âåùåñòâà, ïîñòóïàþùèå èç íåäð Çåìëè, æèâûå îðãàíèçìû ôîðìèðóþò àòìîñôåðó - ãëàâíîå èç óñëîâèé ñóùåñòâîâàíèÿ áèîñôåðû.

Çà ñ÷åò ýíåðãèè ñîëíå÷íîé ðàäèàöèè ïðîäóöèðóþòñÿ ñëîæíûå ìîëåêóëû, êîòîðûå èñïîëüçóþò ñâîé õèìè÷åñêèé ïîòåíöèàë äëÿ ïîñëåäóþùèõ ïðåâðàùåíèé â æèâûõ îðãàíèçìàõ.

Íà ïðîòÿæåíèè âñåé ãåîëîãè÷åñêîé ýâîëþöèè æèâîå âåùåñòâî èãðàëî àêòèâíóþ ðîëü, î ÷åì ñâèäåòåëüñòâóþò îñòàâëåííûå èì ñëåäû â çåìíîé êîðå.

Íàèáîëåå îùóòèìî âëèÿíèå æèâîãî âåùåñòâà íà õèìè÷åñêèé ñîñòàâ àòìîñôåðû, íà êðóãîîáîðîò ìîëåêóë âîäû è óãëåêèñëîãî ãàçà, íà ëàíäøàôòû è êëèìàò ïëàíåòû.

Ìîáèëüíûå ñòðóêòóðû æèâîãî âåùåñòâà ïðèñïîñàáëèâàþòñÿ ê ìåäëåííûì èçìåíåíèÿì åñòåñòâåííûõ òåë â çåìíîé êîðå è íåïîñðåäñòâåííî íå îêàçûâàþò âëèÿíèÿ íà äèíàìè÷åñêèå ñòðóêòóðû çåìíûõ íåäð. Íî âëèÿÿ íà ðåæèì ïîòðåáëåíèÿ ñîëíå÷íîé ýíåðãèè è íà òåðìîäèíàìè÷åñêèå óñëîâèÿ íà ïîâåðõíîñòè Çåìëè, æèâîå âåùåñòâî ñïîñîáíî ìåíÿòü ñêîðîñòü ýðîçèîííûõ ïðîöåññîâ è ïîâåðõíîñòíîãî ìàññîïåðåíîñà.

Áèîñôåðà äåìîíñòðèðóåò ñâîþ ñïîñîáíîñòü ñîãëàñîâûâàòü ðèòìû âîñïðîèçâîäñòâà æèâîãî âåùåñòâà è åãî ñòðóêòóð ñ ñóòî÷íûìè è ñåçîííûìè èçìåíåíèÿìè èíñîëÿöèè.

Íåñîìíåííî, æèâîå âåùåñòâî äîëæíî îáëàäàòü ÷óâñòâèòåëüíîñòüþ ê ýëåêòðîìàãíèòíîìó èçëó÷åíèþ â øèðîêîì ñïåêòðå ÷àñòîò. Ñðåäè âàæíûõ äëÿ îðãàíèçìà ýëåêòðîìàãíèòíûõ êîëåáàíèé äîëæíû ïðèñóòñòâîâàòü è ñîáñòâåííûå ÷àñòîòû Çåìëè. Îñíîâíîé òîí, îïðåäåëÿåìûé âðåìåíåì ïðîáåãà ýëåêòðîìàãíèòíîé âîëíû âîêðóã çåìíîãî øàðà, èìååò ÷àñòîòó ~10Ãö.

Êîñâåííûì ïîäòâåðæäåíèåì ÷óâñòâèòåëüíîñòè æèâûõ îðãàíèçìîâ ê ýòîé ÷àñòîòå êîëåáàíèé ìîæåò ñëóæèòü òî, ÷òî ÷åëîâåê áîëåçíåííî ðåàãèðóåò íà ìåõàíè÷åñêèå ñîòðÿñåíèÿ ñâîåãî òåëà ñ ÷àñòîòàìè 8 - 14Ãö.

Ìîæíî âûñêàçàòü äîãàäêó, ÷òî æèâûå îðãàíèçìû ìîãëè â ïðîöåññå ñòðóêòóðèðîâàíèÿ áèîñôåðû âûáðàòü ýòó ÷àñòîòó äëÿ îáìåíà èíôîðìàöèåé âíóòðè çåìíîãî ïðîñòðàíñòâà è ñ êîñìîñîì.

Ïðåäñòàâëÿåòñÿ èíòåðåñíûì âàðèàöèè ýëåêòðîìàãíèòíûõ êîëåáàíèé âáëèçè ýòîé ÷àñòîòû (èëè êðàòíûõ åé) ñîïîñòàâèòü ñ ðàçëè÷íîãî ðîäà ñîáûòèÿìè â çåìíîì ïðîñòðàíñòâå, êîñìîñå è ÷åëîâå÷åñêîì îáùåñòâå.

3. Î íàòóðôèëîñîôèè.

Ñðåäà îáèòàíèÿ ÷åëîâåêà ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé îãðàíè÷åííóþ îáëàñòü ôèçè÷åñêîãî ïðîñòðàíñòâà, êîòîðàÿ äîïîëíåíà èçîáðåòåíèåì ÷åëîâå÷åñêîãî ãåíèÿ - äóõîâíîé ñôåðîé, ìíîãîìåðíîé è ñàìîðàçâèâàþùåéñÿ.

Íà ñîâðåìåííîì ýòàïå ýìïèðè÷åñêèå ñâåäåíèÿ îá îêðóæàþùåì ìèðå íåïîñðåäñòâåííî íå âëèÿþò íà ìèðîâîççðåíèå ÷åëîâåêà. Â ýòîì ìîæíî óñìîòðåòü ñòðåìëåíèå äóõîâíîé ñôåðû çàùèòèòüñÿ îò ðàçðóøàþùåãî âîçäåéñòâèÿ ÷àñòíûõ, ïîâåðõíîñòíûõ ñâåäåíèé, íàâîäèìûõ ïðèíîðîâëåííûõ êî âñåìó.

Öåëîñòíîå âîñïðèÿòèå âåùåñòâåííîãî ìèðà ïóòåì ñîãëàñîâàíèÿ ýìïèðè÷åñêèõ ñâåäåíèé ñ èäåÿìè è îáðàçàìè äóõîâíîé ñôåðû â ñòðåìëåíèè ê âíóòðåííåé ãàðìîíèè - öåëü è ñîäåðæàíèå íàòóðôèëîñîôèè. Âåùåñòâåííûé ìèð ïîçíàâàåì ëèøü â ïðåäåëàõ ñðåäû îáèòàíèÿ, ãäå îí ïðåäñòàâëåí åñòåñòâåííûìè òåëàìè, èìåþùèìè ñâîå íàçíà÷åíèå â ïðîöåññå âîñïðîèçâîäñòâà îêðóæàþùåé ÷åëîâåêà ñðåäû. Çà åå ïðåäåëàìè äâèæåíèå ïðèðîäíûõ òåë ëèøåíî íàïðàâëåííîñòè - îíî âå÷íî.

Ðàçíîîáðàçèå ÷óâñòâåííîãî âîñïðèÿòèÿ ìèðà íàõîäèò ñâîå îòðàæåíèå â èñêóññòâå, ïîñòèãàþùåì çàêîíû ãàðìîíèè è óòâåðæäàþùåì íðàâñòâåííûå íîðìû. Ãàðìîíèÿ â äóõîâíîé ñôåðå ÿâëÿåòñÿ âûñøèì êðèòåðèåì èñòèíû è äëÿ åñòåñòâîçíàíèÿ.

Â íàñòîÿùåì "Î÷åðêå ãåîìåõàíèêè" ïðåäñòàâëåíà ïîïûòêà íàòóðôèëîñîôñêîãî îñìûñëåíèÿ åå ñîäåðæàíèÿ.

Ëèòåðàòóðà

1. Àðèñòîòåëü. Ñî÷èíåíèå â 4-õ ò., ò. 3. Ìîñêâà, Ìûñëü, 1981.
2. Òîëñòîé Ë. Í. Î ñóùíîñòè ðåëèãèè.
3. Âåðíàäñêèé Â. Í. Ðàçìûøëåíèÿ íàòóðàëèñòà. Â 2-õ êí. Ìîñêâà, Íàóêà, 1977.
4. Øâåéöåð À. Êóëüòóðà è ýòèêà. Ìîñêâà, Ïðîãðåññ, 1973.
5. Àäàìàð Ø. Èññëåäîâàíèå ïñèõîëîãèè ïðîöåññà èçîáðåòåíèÿ â îáëàñòè ìàòåìàòèêè. Ìîñêâà, Ñîâåòñêîå ðàäèî, 1970.
6. Êèòòåëü ×., Íàéò Ó., Ðóäåðìàí Ì. Êóðñ ôèçèêè. Ìåõàíèêà. Ìîñêâà, Íàóêà, 1971.
7. Ñèëà òÿæåñòè è òåêòîíèêà. Ñá. ïîä ðåä. Ê.À. Äå Äæîíãà è Ð. Øîëòåíà. Ìîñêâà, Ìèð, 1976.
8. Ðîäèîíîâ Â. Í. Äèññèïàòèâíûå ñòðóêòóðû â ãåîìåõàíèêå. Óñïåõè ìåõàíèêè, ò. 2, N 4, Âàðøàâà, 1979.
9. Ðîäèîíîâ Â. Í. Ìåõàíèçì çåìëåòðÿñåíèÿ êàê õàðàêòåðèñòèêà ñåéñìè÷åñêîãî ðåæèìà. Â ñá. Çåìëåòðÿñåíèÿ Ñðåäíåé Àçèè è Êàçàõñòàíà 1982 ã. Äóøàíáå, Äîíèø, 1984.
10. Ñàäîâñêèé Ì.À., Ïèñàðåíêî Â.Ô., Ðîäèîíîâ Â. Í. Îò ñåéñìîëîãèè ê ãåîìåõàíèêå. Âåñòíèê ÀÍ ÑÑÑÐ, 1983, N 1.
11. Ðîäèîíîâ Â. Í., Ñèçîâ È.À. Ïðîÿâëåíèå íåîäíîðîäíîñòè íàïðÿæåííîãî ñîñòîÿíèÿ ïðè ðàçðóøåíèè ãîðíûõ ïîðîä. Ôèç.-òåõ. ïðîáëåìû ðàçðàáîòêè ïîëåçíûõ èñêîïàåìûõ. Íîâîñèáèðñê, Íàóêà, 1982.
12. Ãóáêèí Ê.Å. Î ïîäîáèè óïðóãèõ âîëí â òâåðäîé ñðåäå. Èçâåñòèÿ ÀÍ ÑÑÑÐ, Ôèçèêà Çåìëè, N 3, 1984.
13. Ðîäèîíîâ Â. Í., Ñèçîâ È.À., Öâåòêîâ Â. Ì. Îñíîâû ãåîìåõàíèêè. Ìîñêâà, Íåäðà, 1986.
14. Ðîäèîíîâ Â. Í., Øåìÿêèí Å.È. Ãîðíîå ïðîèçâîäñòâî: ôóíäàìåíòàëüíûå ïðîáëåìû ñîõðàíåíèÿ ñðåäû îáèòàíèÿ. Âåñòíèê ÀÍ ÑÑÑÐ, 1990, N 2.
15. Ñàäîâñêèé Ì.À., Ðîäèîíîâ Â. Í., Áåëÿêîâ Ã.Â. Î ìåõàíèçìå âîçíèêíîâåíèÿ êàâèòàöèîííîãî âèõðÿ. ÄÀÍ, 1992, ò. 325, N 1.
16. Àâñþê Þ. Í., Ðîäèîíîâ Â. Í. Ïðèëèâû è ãåîëîãè÷åñêàÿ ýâîëþöèÿ. Ãåîýêîëîãèÿ, 1993, N 4.
17. Ðîäèîíîâ Â. Í. Ñåéñìè÷åñêèé ðåæèì è áëî÷íîå ñòðîåíèå çåìíîé êîðû. Ãåîýêîëîãèÿ, 1995.
18. Ñàäîâñêèé Ì.À., Ðîäèîíîâ Â. Í., Ãîí÷àðîâ À.È. Î êèíåòèêå äåôåêòîîáðàçîâàíèÿ â ìåòàëëàõ ïðè äèíàìè÷åñêîì íàãðóæåíèè. ÄÀÍ, 1994, ò.334, N 5.
19. Ñàäîâñêèé Ì.À., Ðîäèîíîâ Â. Í., Ñèçîâ È.À. Êðèòåðèè ïîäîáèÿ è äåçèíòåãðàöèè ìåäëåííî äåôîðìèðóåìûõ òâåðäûõ òåë. ÄÀÍ, 1995, ò. 341, N 5.
20. Ðîäèîíîâ Â. Í., Ñèçîâ È.À. Î ôîðìèðîâàíèè ðàçëîìà â çåìíîé êîðå. Â ñá. Äèíàìè÷åñêèå ïðîöåññû â ãåîñôåðàõ. ÈÄÃ ÐÀÍ, Ìîñêâà, 1994.
21. Àäóøêèí Â.Â., Ðîäèîíîâ Â. Í. Î ðåæèìå ïîäâèæåê íà ãîðíûõ ñêëîíàõ. Â ñá. Äèíàìè÷åñêèå ïðîöåññû â ãåîñôåðàõ. ÈÄÃ ÐÀÍ, Ìîñêâà, 1994.
22. Ñàäîâñêèé Ì.À., Êî÷àðÿí Ã.Ã., Ðîäèîíîâ Â. Í. Î ìåõàíèêå áëî÷íîãî ãîðíîãî ìàññèâà. ÄÀÍ, 1988, ò.302, N 2.