

## **Интегральность биологического формообразования и теория Тенсегрити**

### ***Морфологическое строение живого***

Тело человека имеет определенную форму, или, выражаясь научным языком, морфологическое строение. То же самое можно сказать об окружающих нас животных и растениях. Форма организма появляется не сразу: в ходе индивидуального развития животного или растения происходят серьезные перестройки. Наука о форме живых организмов называется морфологией, а об их индивидуальном развитии – эмбриологией.

Почему живые организмы имеют определенную форму, и как она появляется в ходе индивидуального развития? Сотни лет лучшие умы человечества бьются над этой загадкой. Процесс выстраивания формы в ходе индивидуального развития живого организма называется биологическим формообразованием, или биологическим морфогенезом. Изучение биологического морфогенеза важно не только с точки зрения фундаментальной науки, но имеет также практическое приложение в медицине: поняв механизмы построения и поддержания формы того или иного органа или системы органов, мы будем глубже понимать причины наследственных заболеваний и других патологий.

### ***Развитие представлений об интегральных факторах морфогенеза***

Основателем первой теории биологического морфогенеза можно считать древнегреческого врача Гиппократ, согласно которому зародыш строится под действием «внутреннего огня»; податливые огню части выгорают, менее податливые уплотняются и формируют системы органов будущего организма. Аристотель считал, что органы зародыша формируются постепенно из бесструктурной поначалу массы. Вопрос о преддетерминированности строения либо о возможности появления новых структур красной нитью проходит через всю историю биологической науки (Белоусов, 2005).

В Новое время в биологии соперничали две основных идеологии: преформизм и эпигенез (Белоусов, 2005). Сторонники преформизма считали, что строение будущего организма закодировано в половых клетках, никаких принципиальных морфологических перестроек в ходе эмбрионального развития не происходит, а есть только рост уже сформированного миниатюрного организма.

Приверженцы эпигенеза полагали, что организм в ходе индивидуального развития образуется путем серьезных морфологических перестроек, а вовсе не как результат роста сперматозоида или яйцеклетки, и что в ходе эмбрионального развития происходит образование принци-

пильно новых морфологических структур, не сводимых к особенностям строения сперматозоида или яйцеклетки.

### ***Экспериментальная эмбриология и проблема интегральности морфогенеза***

Рождение современной экспериментальной эмбриологии приурочено к концу XIX в. На рубеже XIX–XX вв. в эмбриологии начинают соперничать два основных научных подхода: механистический редукционизм Вильгельма Ру (организм рассматривается как сумма частей, а его развитие мозаично) и интеграционный подход Ганса Дриша (данный подход предполагает целостное развитие организма и его способность к саморегуляции) (Белоусов, 2005). Эти взгляды можно рассматривать как возрожденные преформизм и эпигенез, но воспроизведенные на новом концептуальном уровне и новом фактическом материале.

В 1896 г. В. Ру произвел исторический эксперимент: с помощью раскаленной иглы убил одну из клеток зародыша лягушки на двухклеточной стадии развития. Ру обнаружил, что из второй клетки образовалась лишь нежизнеспособная «половинка» зародыша, и сделал вывод о том, что судьба каждой части зародыша жестко predetermined.

Ганс Дриш не согласился с подобным радикальным заявлением Ру и провел другой эпохальный эксперимент. Дробящиеся яйца морского ежа на стадии двух клеток Дриш поместил в сосуд с раствором, не содержащем ионов кальция и разделил на отдельные клетки с помощью встряхивания. В результате этого эксперимента под каждой оболочкой развивалось по две личинки морского ежа. Так было открыто явление эмбриологической регуляции и показано, что жесткой predeterminedности судьбы частей зародыша не существует.

В. Ру и Г. Дриш определили борьбу идей в эмбриологии на весь XX в. и вплоть до нашего времени. Несмотря на расцвет редукционизма в биологии XX в., в то же самое время возникли и получили развитие и интегральные подходы к развитию и функционированию живого организма, эту «идейную линию» можно считать продолжением теоретических воззрений Ганса Дриша. Наиболее известные из интегральных подходов – теория эпигенетического ландшафта К. Уоддингтона и теория морфогенетического поля А.Г. Гурвича, а также применение идей синергетики и нелинейной физико-химии к биологии. Достойное место в ряду этих идей занимает Тенсегрити.

### ***Самонапряженные конструкции и рождение теории Тенсегрити***

Тенсегрити (от английского «tensegrity», «tensional integrity», т. е. напряженная интегральность) – система взглядов, описывающих самонапряженные конструкции, возникла в архитектуре, механике и искус-

стве в 1960-х гг., основоположником этой системы взглядов был Ричард Букминстер Фуллер (Fuller, 1962). Самонапряженными считают такие конструкции, которые имеют стабильную форму за счет постоянного стягивания. Всемирную известность Тенсегрити получила в связи со скульптурными композициями Кеннета Снельсона – его творения из стержней и стягивающих их струн держат форму, но не имеют при этом жесткого каркаса (Jauregui, 2009).

В 1970-х биолог Дональд Ингбер под влиянием идей Фуллера применил принципы Тенсегрити к биологическим структурам и выдвинул теорию о самонапряженном строении клеток, согласно которой цитоскелет клетки можно представить как самонапряженную конструкцию наподобие скульптурных композиций Снельсона: роль стержней в клетке выполняют микротрубочки (они упруги и держат форму), а роль стягивающих «веревочек» – актиновые микрофиламенты и промежуточные филаменты (эти биомолекулы эластичны) (Ainsworth C, 2008).

### ***Живые структуры и баланс механических сил***

Согласно теории Тенсегрити, клетка представляет собой самонапряженную конструкцию на различных уровнях и в разных масштабах (Ingber, 1993, Ingber, 1997). Натяжения порождаются актиновыми филаментами и промежуточными филаментами; они приложены к микротрубочкам внутри клетки или элементам внеклеточного матрикса и сбалансированы. Стабильность части клетки поддерживается как частный случай в общей стабильности клетки по общему принципу самонапряженности. Если что-то в структуре меняется, то меняется также распределение сил, такое изменение может приводить к механической работе: например, исчезновение одной из микротрубочек приводит к усилению механических напряжений внутри части клетки (Ingber, 1993).

Теория Тенсегрити предполагает модульность и самоподобие принципов регуляции на разных уровнях организации живого. Регуляция надклеточных структур за счет внеклеточного матрикса может рассматриваться как модуль более высокого порядка по отношению к «клеточному модулю». С точки зрения баланса механических сил, ткань подобна клетке, клетка подобна части клетки и т. д. Форма как всего организма, так и небольшого фрагмента клетки строится по одним и тем же принципам.

Если нарушить баланс сил, то происходит изменение формы, и таким образом можно регулировать процесс биологического формообразования. На примере ветвления эпителиальной железы – одного из распространенных типов морфогенеза, биологический морфогенез может быть объяснен с точки зрения теории Тенсегрити (Ingber, 2006). В ходе этого процесса происходит утончение внеклеточного матрикса, что ведет к изменению баланса сил, и преднапряженная подлежащая мезенхима вытягивает часть эпителия. В некоторых участках образовав-

шейся структуры внеклеточный матрикс более утончен, и процесс выпячивания части эпителия в мезенхиму повторяется вновь. Теория Тенсегрити может объяснить не только поддержание структур организма в определенной форме, но и образование этой формы в ходе индивидуального развития (т. е. не только статику, но и динамику формы – морфогенез).

Для теории Тенсегрити характерны универсальность и общие принципы в объяснении строения биологических структур, в том числе модульность, самоподобие и принцип обратной связи, она объясняет интегральность разных уровней строения живого.

### **Заключение**

Теория Тенсегрити применяет принципы организации инженерных конструкций к биологическим структурам. Такой подход может показаться большинству биологов радикальным редуционизмом. Представление о микротрубочках как твердых стержнях, а об актиновых и промежуточных филаментах как об эластичных нитях – упрощение, ведь в реальности крупные биологические молекулы имеют сложно описываемые физические свойства.

Тем не менее данная теория имеет несколько очень сильных сторон.

- Универсальность. Тенсегрити объясняет поддержание формы биологических структур на разных уровнях (от субклеточных до целого организма), причем как в статике, так в динамике.

- Общий принцип, лежащий в основе биологических структур. Теория объясняет и предсказывает сложное поведение различных биологических структур, исходя из общего принципа (живая система как самонапряженная конструкция).

- Модульность и самоподобие. Тенсегрити показывает модульность организации живого организма. Модульность лежит в основе иерархии структур в строении организма.

- Принцип обратной связи. Механические напряжения порождаются внутри клеток, но являются также внешними регуляторами идущих внутри клеток процессов.

Несмотря на сильный редуционизм, теория Тенсегрити – интереснейшая попытка современных биологов и физиков объяснить загадку биологического морфогенеза и поддержания биологической формы, исходя из простых принципов самоорганизации.

### **Список литературы**

1. Белоусов Л.В. Основы общей эмбриологии. – М.: Изд-во Москов. ун-та: Наука, 2005. – 368 с.
2. Ainsworth C. Stretching the imagination. Nature. 2008;456(11): 696-699.
3. Fuller R.B. Tensile-Integrity Structures, U.S. Patent No. 3,063,521, November 13, 1962.
4. Valentín Gomez Jauregui. Controversial Origins of Tensegrity In Alberto Domingo and Carlos Lazaro (eds.) Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of

5. Ingber DE. Cellular tensegrity: defining new rules of biological design that govern the cytoskeleton. *J Cell Sci.* 1993;104 ( Pt 3):613-27.

6. Ingber DE. Tensegrity: the architectural basis of cellular mechanotransduction. *Annu Rev Physiol.* 1997;59:575-99.

7. Ingber DE. Mechanical control of tissue morphogenesis during embryological development *Int. J. Dev. Biol.* 2006; 50: 255-266.

**В. С. Смирнова**

### **Биологический потенциал сорго и его холодостойкость**

Большое разнообразие погодных-климатических и почвенных условий России, включающее зачастую неблагоприятные экстремальные условия для вегетации растений, способствует значительным потерям урожая многих сельскохозяйственных культур. Поэтому проблема устойчивости растений к неблагоприятным (стрессовым) условиям имеет большое научное теоретическое и практическое значение. Максимальное использование потенциальных возможностей сельскохозяйственных культур для увеличения зерна, кормов, овощей, плодов и другой продукции предусматривает соответствующий подбор культур и сортов для конкретных агроклиматических условий. Проблема устойчивости растений к низкотемпературному стрессу особенно обострилась в связи с создавшейся в России политической ситуацией и необходимостью перераспределения регионов выращивания различных культур.

Сорго является одной из перспективных культур по урожайности, засухоустойчивости и пластичности, а также отличается чрезвычайно большим разнообразием видов, подвидов и разновидностей. Род *Sorghum* Moench. относится к семейству мятликовых (*Poaceae* Bernh.) и включает 60–70 видов возделываемого сорго и группу полудиких и диких растений. В настоящее время используется систематизация сорго, предложенная Е.С. Якушевским [6], где все многообразие форм сорговых культур подразделено по принципу хозяйственного использования на 4 группы: **зерновое, сахарное, травянистое, веничное** и на 8 видов: **сорго зерновое гвинейское** (*Sorghum guineense* Stapf., *Jakushev.*); **сорго зерновое кафрское** (*S. caffrorum* Beauv., *Jakushev.*); **сорго зерновое негритянское** (*S. bantuanum* *Jakushev.*); **сорго зерновое хлебное** (*S. durra* Forsk., *Jakushev.*) с подвидами сорго эфиопское, сорго нубийское, сорго арабское; **сорго зерновое китайское** (*S. chinense* *Jakushev.*) с двумя подгруппами гаолян обыкновенный, гаолян восковидный; **сорго сахарное** (*Sorghum saccharatum* *Jakushev.*) с двумя подвидами контрактум (сорта имели сжатые метёлки) и эффузум (сорта с развесистыми метёлками); **сорго травянистое, или суданская трава**