

ГЕНОМ *INTOSHIA LINEI* ПОДТВЕРЖДАЕТ ВЗГЛЯД НА ОРТОНЕКТИД КАК СИЛЬНО УПРОЩЕННЫХ SPIRALIA

К.В. Михайлов^{1,2}, Г.С. Слюсарев³, М.А. Никитин¹, М.Д. Логачева^{1,2}, А.А. Пенин^{1,2},
В.В. Алёшин^{1,2}, Ю.В. Панчин^{1,2}

¹НИИ физико-химической биологии имени А.Н. Белозерского МГУ,
г. Москва, Aleshin@genebee.msu.su

²Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, г. Москва

³Биологический факультет Санкт-Петербургского государственного университета,
г. Санкт-Петербург

Ортонектиды – малочисленная (около 20 описанных видов) группа редких паразитов морских беспозвоночных (иглокожих, полихет, немертин, турбеллярий, моллюсков). В XIX веке их рассматривали вместе с дициемидами в качестве класса в составе типа Mesozoa Van-Beneden, 1882, – переходного звена между одноклеточными и многоклеточными (Малахов, 1990). Сейчас тип Mesozoa признают искусственным, но вопрос о происхождении и родственных связях представителей типа остается открытым. Данные по генам 18S рРНК указывают на принадлежность ортонектид к Bilateria, но из-за сильно дивергентных последовательностей не позволяют отнести их к какой-либо группе внутри Bilateria (Pawlowski et al, 1996; Hanelt et al, 1996).

Наиболее продолжительная часть жизненного цикла ортонектид представлена многоядерным плазмодием, прорастающим ткани хозяина и генерирующим короткоживущие половозрелые свободноживущие ресничные стадии (самцов и самок), которые выходят из хозяина для копуляции. Ультраструктура плазмодия и свободноживущих стадий детально изучена (Слюсарев, 2008). Самцы и самки состоят всего из нескольких сотен соматических клеток, лишены пищеварительной и выделительной систем, а их гаметы располагаются прямо под покровами и не окружены стенкой гонады. Гистохимическими методами (окраской фаллоидином, антителами к серотонину) доказано наличие у свободноживущих стадий мышечной и просто устроенной нервной систем (Slyusarev, Starunov 2016).

Нами выполнено секвенирование и черновая сборка ядерного генома одного из представителей ортонектид, *Intoshia linei* (Giard, 1877), паразита немертин *Lineus ruber* (Muller, 1774), собранных в Дальних Зеленцах на литорали Баренцева моря. Общий размер сборки составил около 44 миллионов пар оснований, что близко к минимальным значениям размера генома для многоклеточных животных (Mikhailov et al, 2016). С использованием *ab initio* методов, а также данных из библиотек РНК, в геноме предсказано около 9,000 белоккодирующих генов, что является низким показателем даже среди паразитических представителей животных. Филогенетический анализ с мультигенным набором данных указывает на принадлежность ортонектид к обширной группе беспозвоночных животных Spiralia, включающей кольчатых и плоских червей, моллюсков, колеров, мшанок и ряд близкородственных групп этих организмов.

Анализ генома *I. linei* выявил сокращенный набор Нох генов, выполняющих ключевую роль в разметке тела вдоль переднезадней оси у Bilateria. Геном *I. linei* потерял основные компоненты важных регуляторных путей NF-κB, STAT и Hedgehog, сильно сокращено число генов рецепторов, сопряженных с G-белками, ДНК-связывающих белков, белков с доменами цинковых пальцев. С другой стороны, найдены генетические инструменты, необходимые для построения функциональной нервной системы: многочисленные гены белков ионных каналов, в том числе по одному для потенциал-зависимого натриевого и кальциевого канала и шести калиевых каналов, среди которых имеются типы, специфические для животных, набор генов для ионотропных и метаболотропных рецепторов, одиннадцати белков с паннексиновыми/иннексинируемыми доменами, связанных с формированием электрических синапсов. Судя по геномным предсказаниям, у *I. linei* есть ацетилхолиновые и глициновые

ионотропные рецепторы, но полностью отсутствуют глутаматные ионотропные рецепторы, то есть наблюдается ситуация, обратная таковой в нервной системе гребневики (Stenophora). В геноме *I. linei* кодируется ограниченный набор генов, необходимых для развития нервной системы, включающий гены нетрина – белка, участвующего в направленном росте аксонов, эфринов и их рецепторов, IgSF-CAM, но гены семафоринов и их рецепторов, – других белков, участвующих в сигнальных процессах роста аксонов, отсутствуют. Трудно указать гены, специфические для мышечной системы, поскольку в мышечном сокращении участвуют белки, вовлеченные также в движение цитоплазмы и другие функции не только мышечных клеток. Но в геноме *I. linei* имеется специфический гомолог гена миогенного регуляторного фактора, управляющего развитием мышечной системы других животных, что согласуется с наличием у нее настоящих мышечных волокон.

Список литературы

Малахов В.В. Загадочные группы морских беспозвоночных. Трихоплакс, ортонектиды, дициемиды, губки. – Москва : Изд-во МГУ, 1990. – 144 с.

Слюсарев Г.С. Тип ортонектида (Orthonectida): строение, биология, положение в системе многоклеточных животных // Журнал общей биологии. – 2008. – Т. 69, № 6. – С. 403–427.

Mikhailov K.V., Slyusarev G.S., Nikitin M.A., Logacheva M.D., Penin A.A., Aleoshin V.V., Panchin Y.V. The genome of *Intoshia linei* affirms orthonectids as highly simplified spiralian // Current Biology. – 2016. – Vol. 26, iss. 13. – P. 1768–1774.

Hanelt B., Van Schyndel D., Adema C.M., Lewis L.A., Loker E.S. The phylogenetic position of *Rhopalura ophiocoma* (Orthonectida) based on 18S ribosomal DNA sequence analysis // Molecular Biology and Evolution. – 1996. – Vol. 13, iss. 9. – P. 1187–1191.

Pawlowski J., Montoya-Burgos J.I., Fahrni J.F., Wuest J., Zaninetti L. Origin of the Mesozoa inferred from 18S rRNA gene sequences // Molecular Biology and Evolution. – 1996. – Vol. 13, iss. 8. – P. 1128–1132.

THE GENOME OF *INTOSHIA LINEI* AFFIRMS ORTHONECTIDS AS HIGHLY SIMPLIFIED SPIRALIANS

K.V. Mikhailov^{1,2}, G.S. Slyusarev³, M.A. Nikitin¹, M.D. Logacheva^{1,2}, A.A. Penin^{1,2},
V.V. Aleoshin^{1,2}, Y.V. Panchin^{1,2}

¹Belozersky Institute for Physico-Chemical Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow

²Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow

³Saint Petersburg State University, St. Petersburg

Here we report the genomic sequence of *Intoshia linei*, one of about twenty known species of orthonectids. The genomic data confirms recent morphological analysis asserting that orthonectids are members of Spiralia and possess muscular and nervous systems. The 43 Mbp genome of *I. linei* encodes about 9,000 genes and retains those essential for the development and activity of muscular and nervous systems. The simplification of orthonectid body plan is associated with considerable reduction of metazoan developmental genes, leaving what might be viewed as the minimal gene set necessary to retain critical bilaterian features.